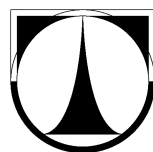


# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



Fakulta strojní  
Katedra materiálů

**Jozef Čičo**

Obor: Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

**Metalografické hodnocení struktury odlitků litých pod tlakem**

**Metallographic evaluation of structure of casts casted under pressure**

KMT – B – 142

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc.

LIBEREC 2009



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

Katedra materiálů

Studijní rok: 2008/2009

# **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

## **NÁVRH**

Jméno a příjmení

**Jozef Čičo**

studijní program

**2341 B Strojírenství**

obor

**Materiály a technologie**

zaměření

**Materiálové inženýrství**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **Metalografické hodnocení struktury odlitků litých pod tlakem**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uvedte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s problematikou odlévání Al slitin pod tlakem
2. Připravte schéma odběru vzorků z odlitku bloku válců s respektováním odlišných tlakových poměrů při plnění dutiny formy.
3. Na získaných vzorcích proveďte optickou i elektronovou metalografickou analýsu a měření mikrotvrdosti strukturních částí.
4. Vyhodnoťte získané výsledky a doporučte další postup.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Roučka, J. a kolektiv - Metalurgie neželezných kovů, Brno, 2004
- [2] Valecký, J.a kol.: Lití kovů pod tlakem
- [3]

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. František Štuchlík, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. David Kvapil – Škoda Auto a.s.

L.S.

Doc. Ing. František STUHLÍK, CSc.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.  
děkan

V Liberci dne 31. 3. 2009

---

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).  
Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

## Anotace

Jméno: Jozef Čičo

Obor: Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

Téma: Metalografické hodnocení struktury odlitků litých pod tlakem

Číslo BP: KMT – B – 142

Vedoucí BP: doc.Ing. František Stuchlík, CSc.

Abstrakt: Práce je zaměřena na stanovení materiálových vlastností odlitku bloku motoru ze slitiny hliníku  $AlSi_9Cu_3$ . Pomocí odebraných vzorků ze dvou naprosto odlišných míst na odlitku, a následných materiálových zkoušek, jsem se pokusil objasnit vliv tlaku a rychlosti tuhnutí na kvalitu odlitku a jeho vnitřní struktury.

Rozsah práce:

|                 |    |
|-----------------|----|
| - počet stran   |    |
| - počet obrázků | 35 |
| - počet tabulek | 8  |
| - počet grafů   | 4  |
| - počet příloh  | 5  |

Klíčová slova: Slitina  $AlSi_9Cu_3$ , Squeeze-Casting, odlitek bloku motoru, zkoušky tvrdosti, zkouška chemického složení, struktura materiálu.

Datum: 4. 6. 2009

## Annotation

Name: Jozef Čičo  
Specialization: Materials and technologies  
Focus: Material engineering  
Topic: **Metallographic evaluation of structure of casts casted under pressure**

Number of BSc. work: KMT – B – 142

Supervisor of BSc. work: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc.

Abstract: The study is focused on characterization of material properties of a cast of an engine made of  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  alloy. Samples were taken from two different parts of the cast. The impact of pressure and speed of solidification on the quality of the cast and its inner structure was examined by several tests of the material.

Scope of the work:

- number of pages: 59
- number of pictures: 35
- number of tables: 8
- number of graphs: 4
- number of supplements: 5

Key words:  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  alloy, Squeeze-Casting, cast of engine cylinder block, tests of hardness, test of chemical composition, structure of material.

Date: 4. 6. 2009

## **Poděkování**

Především bych chtěl poděkovat panu docentu Stuchlíkovi za vedení při vypracování bakalářské práce a za cenné rady. Dále můj dík patří panu inženýru Davidu Kvapilovi za pomoc při zpracování tématu a paní Vlastě Čílové za měření mikrotvrdosti a přípravy metalografických výbrusů. Dále bych chtěl tímto poděkovat rodičům a sestře za celkovou podporu.

Jozef Čičo

## Seznam zkratek

TUL – Technická Univerzita Liberec

HTP - High Torque Performace, neboli vysoký točivý moment

OHV - (**O**ver **H**ead **V**alve) je typ ventilového rozvodu pístového motoru, u kterého jsou ventily umístěny v hlavě válců a vačková hřídel je umístěna v bloku motoru. Mezi vačkovým hřídelem a ventily je relativně velká vzdálenost (přibližně úměrná zdvihu motoru). Přenos pohybu mezi vačkou a ventilem je proto realizován dalšími prvky mechanismu: zdvihátko, zdvihací tyčka, vahadla, které nepříznivě ovlivňují jeho tuhost.

OHC - (**O**ver **H**ead **C**amshaft) je typ ventilového rozvodu pístového motoru, u kterého je kromě ventilu v hlavě válců umístěna i vačková hřídel. Mezi vačkou a ventilem je obvykle vloženo jen zdvihátko válcovitého tvaru. Rozvod tak obsahuje malý počet součástek vhodného tvaru, což zajišťuje jeho vysokou tuhost.

HB - Brinell hardness je statická zkouška tvrdosti materiálu. Princip spočívá ve vnikání zkušebního tělesa - indontoru - kulového tvaru do zkoumaného materiálu a následného zjištění průměru vtisku.

HV - Vickers hardness je statická zkouška tvrdosti materiálu. Princip spočívá ve vnikání zkušebního tělesa - indontoru - diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  do zkoumaného materiálu a následného zjišťování míry deformace tohoto materiálu. Měřítkem tvrdosti materiálu jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu.

## Obsah

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. Teoretická část</b>                     | str. 8.  |
| 1.1. Tlakové lití slitin Al                   | str. 8.  |
| 1.2. Slitina $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$       | str. 10. |
| 1.3. Odlitek bloku motoru                     | str. 11. |
| 1.4. Technologický postup výroby bloku motoru | str. 12. |
| 1.5. Technologie Squeeze-Casting              | str. 14. |
| 1.6. Teorie zkušebních metod                  | str. 17. |
| 1.6.1. Zkouška tvrdosti podle Brinella        | str. 18. |
| 1.6.2. Zkouška tvrdosti podle Vickerse        | str. 20. |
| 1.6.3. Kvantometr                             | str. 23. |
| 1.6.4. Optická, elektronová metalografie      | str. 24. |
| <br>  |          |
| <b>2. Praktická část</b>                      | str. 29. |
| 2.1. Odebrání vzorků                          | str. 29. |
| 2.2. Definování míst analýzy                  | str. 29. |
| 2.3. Praktická část-experimenty               | str. 29. |
| 2.3.1. Měření tvrdosti                        | str. 33. |
| 2.3.2. Optická, elektronová metalografie      | str. 37. |
| 2.3.3. Kvantometr                             | str. 43. |
| 2.4. Zhodnocení výsledků                      | str. 44. |
| <br>  |          |
| <b>3. Závěr</b>                               | str. 45. |
| <b>4. Použitá literatura</b>                  | str. 46. |
| <b>5. Seznam příloh</b>                       | str. 47. |
| Přílohy                                       |          |
| Prohlášení                                    |          |



# 1. TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1. Tlakové lití hliníku a jeho slitin

Hliník má chemickou značku Al. Je to neušlechtilý stříbřitě šedý, nestálý, kujný kov, elektricky velmi dobře vodivý. Tavicí teplota je 660,32 C°. Al krystaluje v soustavě krychlové, krystalová mřížka je plošně centrovaná. Hliník je v čistém stavu velmi reaktivní, na vzduchu se však rychle pokryje tenkou vrstvičkou oxidu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která chrání kov před další oxidací. Je velmi dobře rozpustný ve zředěných kyselinách, koncentrovaná kyselina dusičná jej však stejně jako vzdušný kyslík, pokryje pasivační vrstvou oxidu (Michna a kol. 2005).

Lití kovů pod tlakem je způsob výroby odlitků, při němž je roztavený kov vstřikován do trvalé formy velkou rychlostí (10 až 100 m/s). Vysoké rychlosti je dosaženo velkým zúžením vtoku a vysokým tlakem v místě, které se nazývá vtokové naříznutí. Během krátké doby tuhnutí zůstává kov pod vysokým tlakem. Velká rychlost plnění a vysoký tlak umožňují odlévat tenkostěnné a členité odlitky nevyžadující jiné opracování než odstraňování vtoků a otřepů. Tím se tato metoda blíží k ideální přímé přeměně materiálu v hotový výrobek. Jedinou operací je tekutý kov v několika vteřinách přeměněn v komplikovaný odlitek hladkého povrchu a přesných rozměrů. (Valecký a kol. 1963)

Rychlost kovu ve vtokovém naříznutí se volí podle členitosti a složitosti odlitku. Okamžitého ochlazení odlitku se dosáhne rychlým odvedením tepla ocelovou formou, jejíž části jsou chlazeny vodou, proudící ve vrtaných kanálech. Lití kovů pod tlakem má mnoho předností oproti ostatním způsobům lití. Porovnáme-li s litím do písku nebo kokil dosahuje se jím většího výkonu, větší přesnosti, kvalitnějšího povrchu odlitků a lepšího využití kovu. Litím kovů pod tlakem vzniká úspora na váze odlitku, na opracování, na skladovacích nákladech, úspora místa a investic, pracovních sil, zrychlení výroby, zlevnění výroby, zlevnění výrobku a snadná přizpůsobivost okamžité potřebě odlitků za předpokladu, že jde o rentabilní sériovost. Mezi další přednosti patří tenkostěnnost odlitků, dobré mechanické vlastnosti, možnost předlití všech nebo většiny otvorů a možnost zalévání vložek z jiného kovu.

Lití pod tlakem se nejprve používalo pro přesné lití tiskařských písmen. V té době vzniklo lití slitin olova pod tlakem, které má ve strojírenství jen omezený význam. Rovněž se začaly pod tlakem odlévat některé slitiny cínu. Ani u nich nečinilo potíže vyrobit z uhlíkové nástrojové oceli dostatečně odolnou formu. Lití cínových slitin pod tlakem se používá dodnes pro některé speciální účely, a to zejména tam, kde se požadují nejpřísnější rozměrové tolerance, protože smrštění u těchto slitin je malé. Trvalo dlouho, než se při lití pod tlakem rozšířilo používání zinkových slitin, které pro svou nízkou teplotu tavení dovolují práci na strojích s teplou komorou, přičemž formy mohou být z méně náročných slitinových nástrojových ocelí. Aby se mohlo rozšířit používání zinkových slitin, bylo třeba nejprve překonat jejich velmi malou odolnost proti mezikrystalické korozi ve vlhkém vzduchu, která jak se ukázalo, souvisí s čistou používaného zinku. Pro mnohé účely však tyto slitiny zcela nevyhovovaly, kvůli jejich špatným mechanickým vlastnostem, velké specifické hmotě a z důvodu náchylnosti ke korozi.

Nemalé problémy činily i hliníkové slitiny. Bylo třeba překonat mnoho všeobecných problémů společných slévárenství hliníkových slitin a i problémů speciálních, daných podstatně vyšší teplotou tavení hliníku, a tím, že hliník tvoří se železem slitiny. Nešlo tedy jen o to, že činné části stroje a ocelové formy musí pracovat při vyšší teplotě, kdy jejich pevnostní vlastnosti jsou horší, ale i to, že ocelové části stroje jsou napadány roztavenou hliníkovou slitinou, ve které se tak může nepřípustně zvětšit obsah železa. Velký význam pro lití hliníkových slitin mají stroje se studenou lící komorou, až ty dovolily také výrobu odlitku z čistého hliníku. Na stroje se studenou lící komorou se do současné doby soustředil technologický vývoj téměř výlučně a vedl k dokonalému vypracování postupu lití hliníku a jeho slitin pod tlakem, které není možné na strojích s teplou komorou provádět.

Hliník lze odlévat o čistotě až 99,8%, je zde ale problém s lepením i když železo zaujímá největší podíl ze všech nečistot. Odlitků z čistého hliníku se používá pro elektrotechnické účely a to především na kluzné rotory elektromotorů. Hliníkové odlitky mají výbornou elektrickou vodivost.

Největšího využití mají hliníkové slitiny. Vychází se ze slitin vyvinutých dříve, které jsou nyní rozšířeny o možnost lití pod tlakem na strojích se studenou komorou. Avšak hliníkových slitin vhodných pro tlakové lití je méně než slitin na odlitky do písku, protože se musí přihlížet k speciálním technologickým požadavkům. Nejpoužívanější slitiny se rozdělují na slitiny hliník-křemík (Al-Si), které se dále dělí na eutektické slitiny, podeutektické slitiny a slitiny Al-Si s malou přísadou hořčíku (Mg). Další skupinou jsou slitiny hliník-křemík-měď (Al-Si-Cu) a hliník-hořčík (Al-Mg).

Pokud jde o technologickou vhodnost těchto hlavních skupin, rozhoduje křehkost a malá pevnost za vyšších teplot a schopnost vyplnění formy, která závisí na tepelném obsahu vztaženém na objem a na teplotním intervalu tuhnutí.

Obsah železa je ve všech těchto slitinách důležitým technologickým činitelem. Dokud se používalo pro lití hliníkových slitin strojů s teplou komorou, byl jedním z nejdůležitějších kritérií pro použitelnost slitin vliv znečištění železem, ke kterému vždy docházelo. U strojů se studenou komorou už není při lití žádné nebezpečí znečištění železem. V udržovací peci lze čelit znečištění železem výmazem litinového kelímku. Otázka vlivu železa při lití však zůstává aktuální, neboť jeho obsah i v malých množstvích snižuje rychlost reakce mezi vstříkovanou slitinou a límcem formy a je zde nebezpečí lepení.

V malých množstvích do 1 až 1,5 % zvyšuje u všech slitin železo pevnost, nesnižuje tažnost a zmenšuje lineární smrštění. U některých slitin zlepšuje i obrobitelnost. Záleží na složení slitiny, od kterého obsahu se projeví zřetelně nepřípustné vlastnosti, zejména větší sklon k praskání, snížení zabíhavosti, sklon k segregaci a snížení odolnosti proti korozi. Železo tvoří s hliníkem sloučeninu  $\text{FeAl}_3$ , která, jsou-li předpoklady k jejímu vyloučení, dává popud k hrubé krystalizaci (Valecký a kol. 1963, Ragan a kol. 2007).

## **1.2. Slitina hliníku $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$**

Slitiny této skupiny se hojně používá, a to zejména jako slitin druhého tavení. Pravidlem je, že obsah křemíku je vždy větší než obsah mědi. Odolnost těchto slitin proti korozi je menší, zvláště v případě slitin druhého tavení s větším obsahem

nečistot. Platí, že zvýšený obsah železa lze i u těchto slitin kompenzovat obsahem manganu, jenž by měl být v mezích 0,3 – 0,6%.

### **1.3. Odlitek bloku motoru**

Blok motoru patří mezi hlavní a největší odlitky motoru. Blok válců se odlévá společně s klikovou skříní, v některých odůvodněných případech se blok válců vyrábí jako samostatný díl a kliková skříň se připojuje pomocí šroubů u velkých nebo u vzduchem chlazených motorů. V bloku motoru jsou vytvořeny kanály pro rozvod mazacího oleje a dutiny pro chladicí kapalinu.

Podle použití můžeme rozdělit konstrukce bloků na několik typů. V první řadě je rozdíl mezi bloky pro motory s rozvodem OHV a OHC. Dále podle použitého materiálu máme bloky litinové a z hliníkové slitiny. Hořčíková slitina se používá výjimečně, pouze v případě absolutní nutnosti snížit hmotnost motoru (závodní a letecké motory). Z hořčíkových slitin se vyrábějí různá víka a olejové vany, ovšem ne v hromadné výrobě. Vynikajícím materiálem z hlediska pevnosti a hmotnosti je titan, ale výroba bloku z tohoto obtížně opracovatelného materiálu je extrémně drahá.

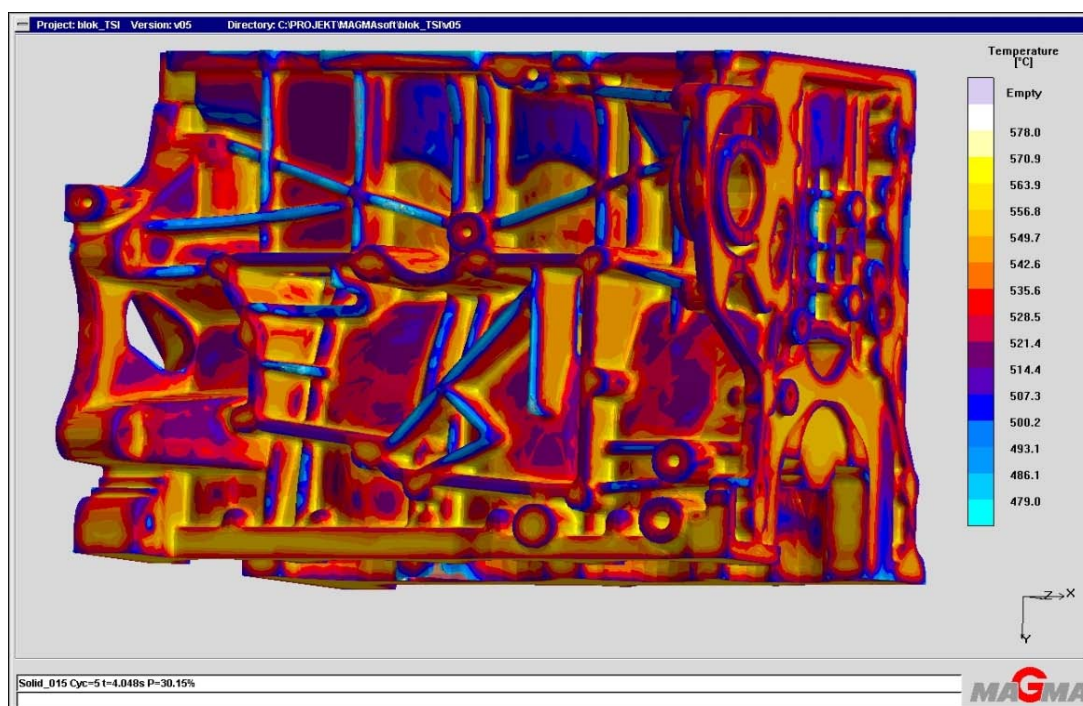
Rozdílné bloky jsou pro motor chlazený kapalinou a vzduchem a konstrukce motoru je ovlivněna také uspořádáním válců. Blok pro řadové motory se řeší podle jiných kritérií, než blok pro V-motory. Významným hlediskem pro konstrukci je použitý typ válců, podle toho se vkládají vložky suché, mokré nebo vyrobené přímo v bloku. Také rozlišujeme bloky z jednoho kusu a bloky dělené.

V současné době se pro výrobu bloků motoru používá převážně hliníková slitina. Má 3x nižší měrnou hmotnost, ale vzhledem k nižší pevnosti hliníkové slitiny musí mít silnější stěny a tak snížení hmotnosti je asi jen o 50%. Hliníkové slitiny mají několik nevhodných vlastností. Například se v nich nedají vytvářet závit pro větší zatížení (hlava válců, víka uložení klikového hřídele) a musí se zalévat speciální vložky tak, aby byl konec závitu pod úrovní stěny bloku (platí i pro litinu, závit se neřeže od dosedací plochy). Materiál zatížení vydrží, ale problémem je nutnost opakované montáže a demontáže, kterou závit vyřezaný přímo v hliníkové slitině nedokáže zaručit. Vnitřní plocha válců z hliníkové slitiny má malou odolnost proti opotřebení, a

pokud se neprovede drahá úprava povrchu nánosem odolných kovů, válce nelze prakticky používat. Proto se používají vložené válce z legované litiny. V nynější době se bloky z hliníkových slitin odlévají tlakově, což je technologie vhodná pro hromadnou výrobu. Přes všechny nevýhody je při výrobě snaha o přechod z litiny na hliníkové slitiny, protože hledisko nízké hmotnosti začíná nabývat na významu. Pro menší pevnost se závity pro šrouby hlavy válců vytvářejí hlouběji v bloku, a buď se použijí zalité ocelové závitové vložky, nebo se provede vyřezání závitu většího rozměru, do kterého se zašroubuje speciální závitová vložka, umožňující opakovanou demontáž šroubu. Odlitek se dále opracuje podobně jako odlitek litinový (Valecký a kol.1963, Ragan a kol. 2007).

#### 1.4. Technologický postup výroby bloku motoru

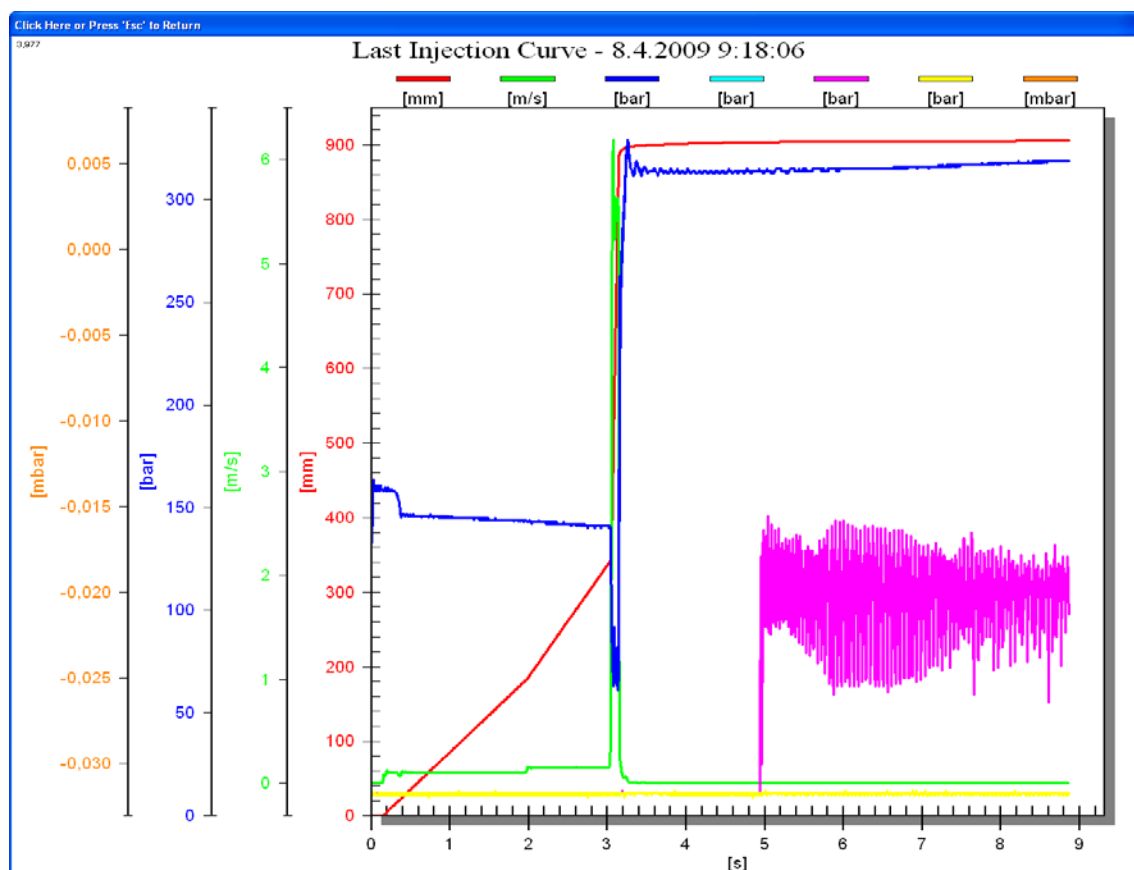
Hliníkový blok motoru je odléván vysokotlakým způsobem. Při této metodě je roztavený kov o teplotě 670°C vstřikován pod tlakem a velkou rychlostí a do kovové formy. Forma musí zaručovat kvalitní odvzdušnění. Probíhá velmi rychlé tuhnutí kovu při zpomaleném smršťování odlitku ve formě a následné vyjmutí odlitku z dutiny formy při vyšší teplotě. V případě nebezpečí ztuhnutí tenkých stěn odlitku je důležité množství tepla, které je nutné odvézt formou do ztuhnutí odlitku. K rozpoznání problematických míst se používá simulace tuhnutí odlitku (Obr. 1).



Obr. 1 Simulace tuhnutí odlitku. (Snímek pořízen v programu MAGMA)

Blok motoru je odléván na strojích s horizontální studenou komorou, s přidavným zařízením na dávkování kovu, které se nazývá udržovací pec. Udržovací pec proto, že se do ní již tavenina o dané teplotě nalévá a pouze se na teplotě udržuje. Pec nemusí mít velký topný výkon. Přesto topit musí. K topení slouží topné tyče (elektrické), které jsou v plášti pece. Tavenina se udržuje na teplotě  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

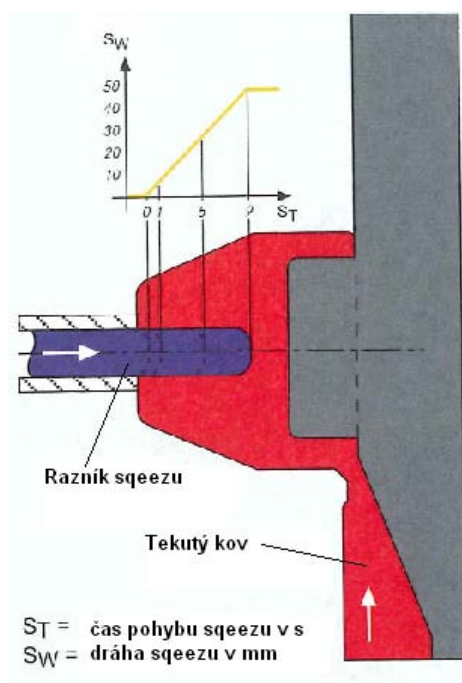
Stroj může pracovat v automatickém cyklu. Po spuštění stroje robot vloží vložky válců do dutiny formy, forma se uzavře a zároveň se zařízení na dávkování kovu otevře a roztavený kov nateče do plnicí komory. Lisovací píst pohybem dopředu zajistí dokonalé naplnění dutiny formy. Další operaci znovu provádí robot, který vyjme odlitek bloku motoru z dutiny formy a pronese ho přes olamovadla vtokových soustav. Dále ho předloží ke kontrole celistvosti, aby se zjistilo, zda ve formě nezůstala část vtokové soustavy (ledvinka apod.), která by mohla vést k poškození formy. Když blok motoru vyhoví, je položen na dopravníkový pás k dalšímu zpracování. Před opakováním cyklu je forma ošetřena tlakem vodního roztoku zvaného separátor, který zajistí částečné ochlazení, ale i dokonalé vyčištění od zbytků z předchozího lití. Následuje založení vložek válců, plnění komory a pracovní cyklus se znovu opakuje. Na obr. 2 je znázorněna rychlost a časový průběh tlaku.



Obr. 2 Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru

## 1.5. Technologie Squeeze-Casting

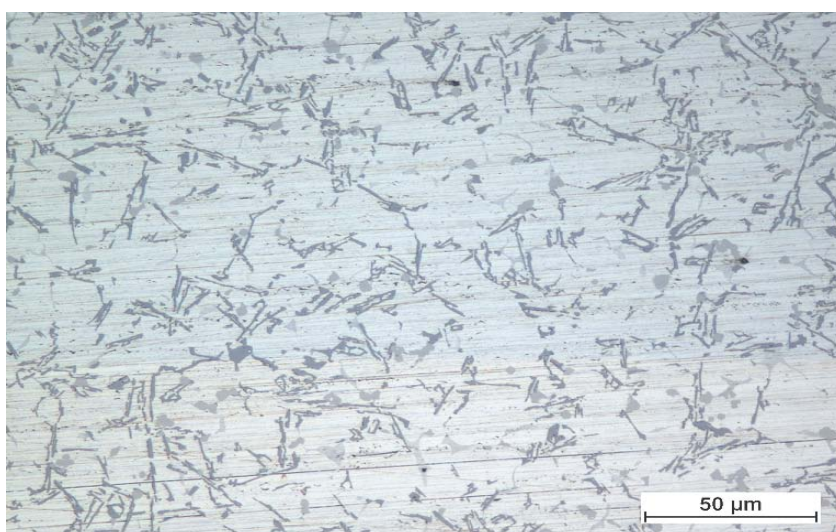
Již ve 30. letech minulého století byla vyvinuta metoda lití s krystalizací pod tlakem (LKT), která v anglické literatuře je označována Squeeze-Casting (Obr. 3). Zde se využívá pokojné plnění formy bez turbulence, strhávání a uzavírání plynů v dutině formy. Plnění formy taveninou je při rychlosti 0,5 m/s. Tlak působící na taveninu, který vzniká kusovníkem (resp. tvarovým razníkem) činí 80 až 110 MPa a příznivě působí na utváření krystalické struktury odlitku. Tato struktura je nositelkou dobrých mechanických vlastností a proto nachází uplatnění především při výrobě namáhaných a jakostních odlitků. Tavenina se vlévá do dutiny jakési půlené slévárenské formy, která může být libovolného tvaru. Pak následuje stlačení taveniny různě tvarovaným pístem, výdrž tlaku pístu a nakonec odlehčení pístu a vyjmutí odlitku z formy. Lití s krystalizací pod tlakem se dělí na dvě základní skupiny, metodu přímou (Direct Squeeze-Casting) a metodu nepřímou (Indirect Squeeze-Casting). U přímé metody LKT může horní část nástroje tvořit píst, lisovník nebo kombinace pístu a lisovníku nebo speciální konstrukce lisovníku přes napájecí kanály pro vlévání taveniny (Slévárství 2004, Ragan a kol. 2007).



Obr. 3 Technologie lití s krystalizací pod tlakem (Squeeze-Casting).



Metoda LKT, kde se krystalizační tlak vyvozuje nepřímo, je velmi podobná konvenčnímu tlakovému lití na tlakových strojích se studenou horizontální plnicí komorou. Tlak se při této variantě pohybuje v rozsahu 55 až 300 MPa i více, nejčastěji však v rozsahu 80 až 110 MPa. Vzhledem k tomu, že tavenina je kratší dobu v kontaktu s chladnou stěnou formy, než v případě použití lisovníku při metodě LKT (tj. neprobíhá žádné předběžné vyrovnání teplot mezi taveninou a formou), je rychlost ochlazování ve stavu kapalném větší. Krystalická struktura je potom jemnější, což se projevuje zmenšením dendritů nejen v povrchových vrstvách, ale také ve středních partiích odlitku. Na obr. 4 je zobrazena struktura, která se získává krystalizací pod tlakem.



Obr. 4 Struktura odlitku ze slitiny  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  s krystalizací pod tlakem.

Lití s krystalizací pod tlakem je vhodné pro odlévání běžných slévarenských slitin. Největší uplatnění našlo při odlévání slitin hliníku. Mezi další výhody této metody patří fakt, že odlitky neobsahují plynové bubliny ani staženiny a nedochází k segregaci přísadových prvků. Lze odlévat jak tenkostěnné, tak i tlustostěnné odlitky (velikost a tlustostěnnost odlitku je závislá na dodržení vysoké rychlosti ochlazování formy). Při uplatnění této metody je nutno věnovat pozornost řadě nejrůznějších činitelů (tj. jakost a teplota taveniny, teplota formy pístu, hodnoty tlaku a jeho časovém působení, atd.). Při metodě Squeeze-Casting se používají velké plochy zářezů (naříznutí) tak, aby vzniklo laminární proudění taveniny. Odvzdušňování taveniny nastává během plnění formy. Metodou Squeeze-Casting je možno odlévat odlitky specifického tvaru, např. disky kol automobilů, písty spalovacích motorů a další různé pevnostní tvarové díly. Mezi nevýhody této metody se řadí dlouhá doba



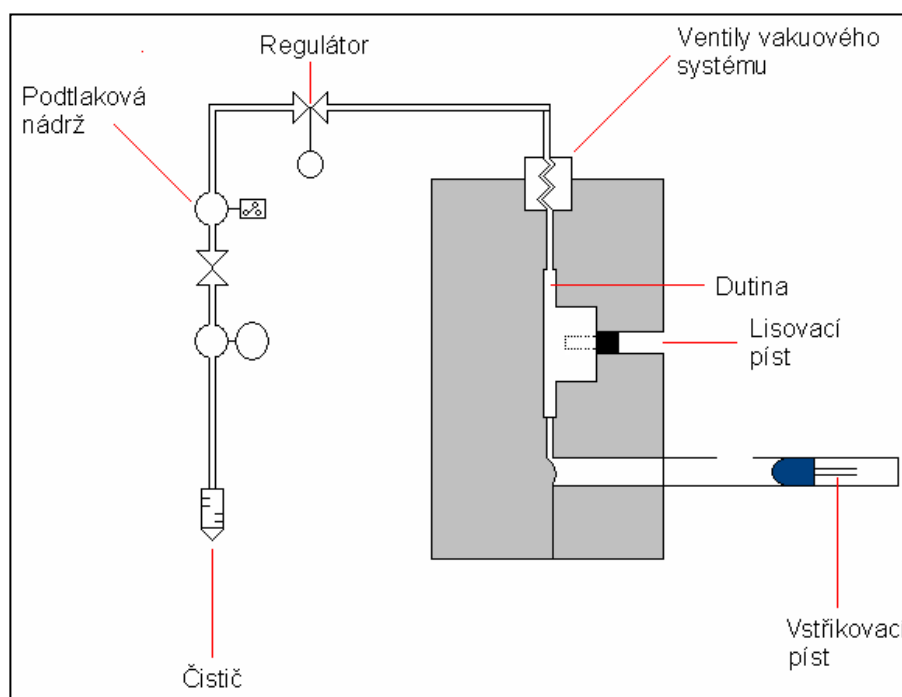
provedeního cyklu a vyšší tepelná únava formy. Další nevýhodou je velikost odlitku, která je limitovaná požadavkem vysoké rychlosti ochlazování, což nelze splnit u rozměrných odlitků. Jsou zde vysoké investiční náklady na zařízení i formu.

Nepřímá metoda užívá píst, jehož pracovní poloha je vodorovná nebo svislá. Tento způsob je podobný vysokotlakému lití. Metoda nepřímého lití se používá např. u klasického tlakového lití odlitků s horizontální komorou, kde se v místech tepelných uzlů aplikuje stlačení speciálním pístem. Metoda nepřímého lití Squeeze-Casting se označuje také jako Squeeze-Casting lokální. Do této skupiny odlévání se řadí také specifická metoda lití s krystalizací pod tlakem s vynuceným prouděním. Metoda lokálního Squeeze-Casting našla uplatnění např. při výrobě bloků motorů 1, 2 L (Obr. 5) ve ŠKODA-Auto v Mladé Boleslavi.



Obr. 5 Blok motoru ŠKODA 1,2 L se Squeeze-Casting.

Tyto bloky se odlévají klasickou metodou vysokotlakého lití s vakuovanou slévárenskou formou a v místech odlitku, kde je nebezpečí vzniku porozity se uplatňuje lokální Squeeze-Casting (Obr. 6) (Slévárenství 2004, Ragan a kol. 2007).



Obr. 6 Schéma vakuování formy a lokální metody Squeeze-Casting (ŠKODA – Auto v Mladé Boleslavi).

## 1.6. Teorie zkušebních metod

Účelem materiálových zkoušek je získat podklady pro výpočet konstrukce, posouzení vhodnosti materiálu pro určitý způsob technologického zpracování, ověření chování materiálů za provozu, popř. kontrola jakosti polotovaru nebo hotového výrobku. Podle uvedených hledisek lze materiálové zkoušky rozdělit do skupin: mechanické, technologické, speciální, ověřující jakost materiálu, defektoskopické. Z výsledků mechanických zkoušek se získávají dovolená namáhání pro výpočet konstrukcí. Zkoušky technologické poskytují informace o použitelnosti materiálu pro určitý způsob technologického zpracování. Zkoušky speciální poskytují informace o chování materiálu za speciálních podmínek (odolnost proti opotřebení, korozi). Při zkouškách ověřujících jakost materiálu je prováděna chemická analýza a metalografické. Defektoskopické zkoušky slouží ke kontrole povrchových a vnitřních vad polotovarů a hotových výrobků bez jejich porušení. Všechny tyto uvedené zkoušky jsou přesně stanoveny normami (odběr vzorků, jejich tvar, rozměry a metodika provádění) aby jednotlivé zkoušky byly navzájem porovnatelné.

### 1.6.1. ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA HB

Autorem metody je švédský inženýr J. A. Brinell. Podstatou zkoušky je vtlačování kalené ocelové kuličky do zkušebního vzorku (Obr.7) a zatížení se nechá působit po určité době. Tvrdost je určena vztahem:

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

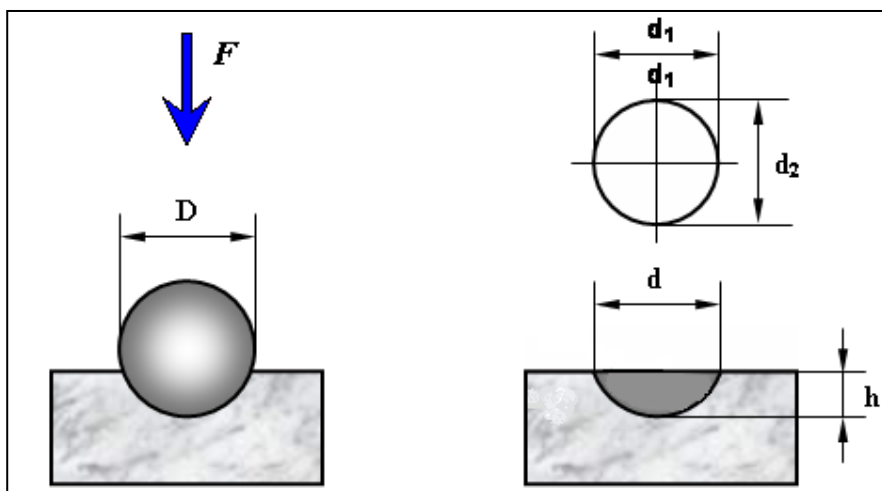
$F$ ... zkušební zatížení v [N]

$D$ ... průměr kuličky v [mm]

$d$ ... aritmetický průměr vtisku v [mm];  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

$h$ ... hloubka vtisku v [mm];  $h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$

konstanta...  $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,807}$



Obr. 7 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella

Po odlehčení se změří průměr vtisku ve dvou navzájem kolmých směrech a z tabulek podle ČSN se pro příslušný průměr kuličky a zatížení určí tvrdost. Průměr kuličky a příslušné zatížení jsou pro jednotlivé materiály určeny ČSN.

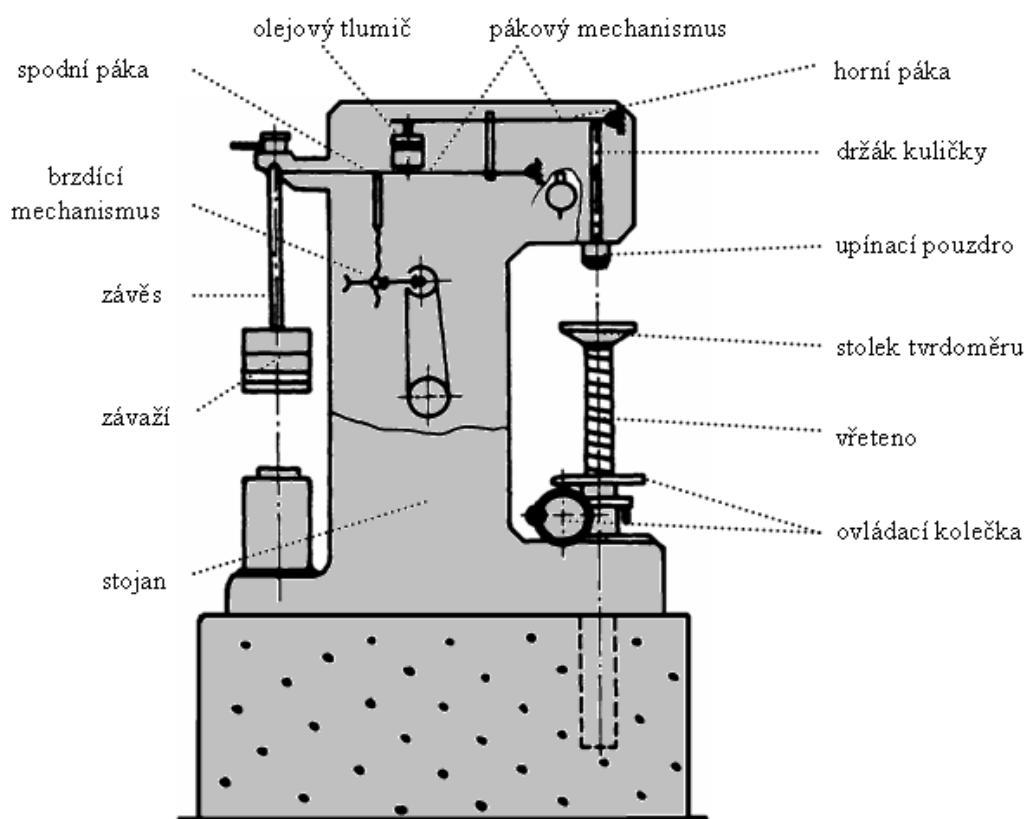
Zkoušku provádíme na hladkém a rovném povrchu dokonale očištěném od okují a mazadel. Při přípravě zkušebního vzorku je potřeba dbát na to, aby nedošlo k ovlivnění povrchu ohřevem nebo tvářením za studena. Minimální tloušťka vzorku

musí být osminásobek předpokládané hloubky vtisku a na protilehlé straně nesmí být patrné žádné stopy deformace po provedení zkoušky.

Měření musí probíhat při teplotě okolí 10-35°C. Zkoušený vzorek musí být na tuhé podložce, při zatížení se nesmí pohnout. Během zkoušení nesmí na přístroj působit žádné rázy a chvění, mohlo by dojít k ovlivnění výsledků zkoušky. Velikost zatěžující síly volíme tak, aby průměr vtisku  $d$  byl v rozmezí 0,24 až 0,60 násobku průměru vnikací kuličky  $D$ . Poměr  $\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$  musí být volen s ohledem na zkoušený materiál a jeho tvrdost. Průměr vtisku, který zanechala kulička po zatížení, se měří ve dvou na sebe kolmých směrech  $d_1$  a  $d_2$ . Pro stanovení tvrdosti podle Brinella se použije aritmetický průměr  $d$  obou změřených hodnot. Hodnotu tvrdosti podle Brinella určíme z tabulek v normě podle použitého indentoru, velikosti zatížení  $F$  a průměru  $d$  vtisku.

Zkušební zařízení pro měření tvrdosti podle Brinella se skládá ze tří částí. První část je zkušební přístroj podle normy ČSN EN ISO 6506-2, který musí být schopen vyvolat a stanovit požadované zatížení v rozsahu  $9,807 \div 29,42 \cdot 10^3$  N. Druhou částí je vnikací těleso - leštěná kulička, která je z kalené oceli nebo tvrdokovu podle normy ČSN EN ISO 6506-2. Poslední částí je měřicí zařízení, které musí odpovídat normě ČSN EN ISO 6506-2.

Přístroj na měření (Obr. 8) má mohutný stojan tvaru písmene C. Potřebná zatěžovací síla je vyvolána pákovým mechanismem. Horní páka s olejovým tlumičem je propojena prostřednictvím břitu a tlačného čepu s držákem kuličky (indentoru). Na zadním břitu spodní páky je uložen závěs se závažími. Závaží jsou označena písmeny a v tabulce, umístěné na stojanu tvrdoměru, je uvedeno, jaké závaží má být pro dané zatížení použito. Rychlost spouštění zatěžovací páky odpovídající podmínkám zkoušky je zajišťována brzdícím mechanismem, který je poháněn elektromotorem. K umístění zkoušeného vzorku slouží stolek, který je fixován na vřetenu vedeném ve stojanu vřetene. Vřeteno je výškově nastavitelné pomocí koleček. Rovinné vzorky musí být uloženy na doraz k upínacímu pouzdru (Veles 1989).

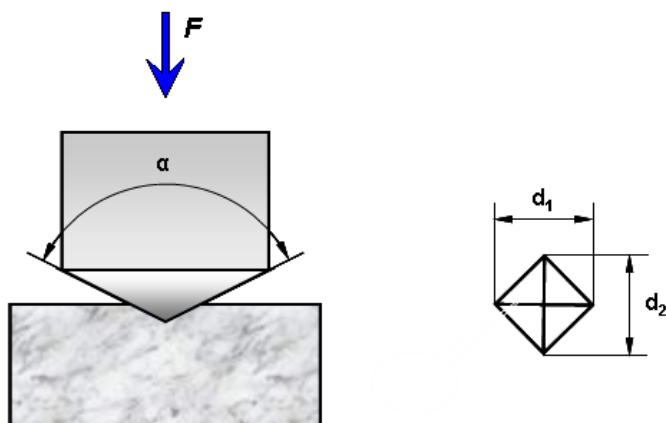


Obr.8 Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Brinella.

Výsledky naměřených hodnot se zapisují tímto způsobem: 93 HB 2,5 / 62.5 / 40. Před zkratkou HB se uvádí hodnota tvrdosti a následující čísla charakterizují, za jakých podmínek byla zkouška prováděna: 93 – tvrdost, HB – metoda měření podle Brinella zkušební tělísko – kulička, 2,5 – kulička o průměru 2,5 mm, 62,5 – zatížení působící na kuličku  $F = 612,9 \text{ N}$ , 40 – zatížení působilo 40 sekund.

### 1.6.2. ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE HV

Tato zkouška je založena na stejném principu jak předchozí zmíněná podle Brinella. Do zkoušeného materiálu se vtlačuje čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Po odlehčení se změří úhlopříčky na vzniklém útvaru (Obr. 9). Tvrdost se pak vyjadřuje měrným zatížením na povrch vtisku. Metoda byla poprvé použita v Anglii R. L. Smithem a G. E. Sandlandem v roce 1922. Přístroj byl zkonstruován ve firmě Vickers. Metoda je přesná a citlivá, proto se používá především v laboratořích. Můžeme ji rozdělit do tří kategorií podle velikosti zatěžovací síly (Tab.1).



Obr. 9 Schéma měření tvrdosti podle Vickerse

| Označení  | Symbol tvrdosti | Zkušební zatížení F [N] | Zkušební metoda   |
|---|-----------------|-------------------------|-------------------|
| Zkouška tvrdosti podle Vickerse                     | HV 5 ÷ HV 100   | 49,03 ÷ 980,7           | ČSN EN ISO 6507/1 |
| Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení | HV 0,2 ÷ < HV 5 | 1,961 ÷ < 49,07         | ČSN EN ISO 6507/2 |
| Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse                | < HV 0,2        | < 1,961                 | ČSN EN ISO 6507/3 |

Tab. 1 Rozdělení HV metody, podle velikosti zatěžovací síly.

Tvrdot podle Vickerse je určena vztahem:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

HV... tvrdost podle Vickerse

F... zkušební zatížení v [N]

$\alpha$  ... vrcholový úhel vnikacího tělesa (jehlanu);  $\alpha = 136^\circ$

d... úhlopříčka vtisku v [mm];  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

konstanta...  $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,807}$

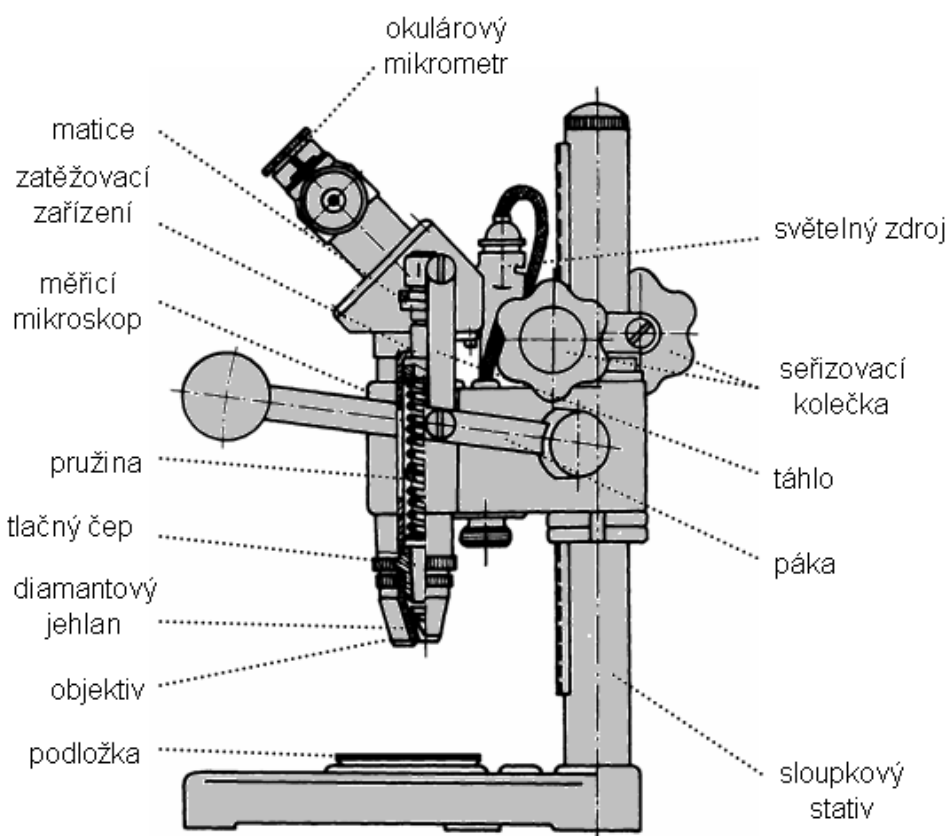
Zkoušku provádíme na hladkém a rovném povrchu dokonale očištěném od okují a mazadel. Při přípravě zkušebního vzorku je potřeba dbát na to, aby nedošlo k ovlivnění povrchu ohřevem nebo tvářením za studena. Minimální tloušťka vzorku

musí být nejméně  $1,5 \times d$ . Na protilehlé straně zkoušeného vzorku, po provedení zkoušky nesmí být patrné žádné stopy deformace. Provádíme-li zkoušky na zakřivených plochách, musíme použít opravné součinitele.

Měření musí probíhat při teplotě okolí  $10 - 35^{\circ}\text{C}$  zkoušený vzorek musí být na tuhé podložce, při zatížení se nesmí pohnout. Během zkoušení nesmí na přístroj působit žádné rázy a chvění, mohlo by dojít k ovlivnění výsledků zkoušky. Na zkoušku musíme použít některé z předepsaných zkušebních zatížení  $F$ . Vnikací těleso je zatlačováno do zkoušeného tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatěžování do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Rychlost vnikajícího tělesa při vtláčování do povrchu vzorku nesmí překročit  $200 \mu\text{m/s}$ . Doba působení plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí  $10 \div 15$  s. Změří se délky úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$ . Pro stanovení tvrdosti podle Vickerse se použije aritmetický průměr  $d$  obou změřených úhlopříček ( $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ). Hodnotu tvrdosti podle Vickerse určíme z tabulek v normě podle použitého zatížení a aritmetického průměru  $d$  úhlopříček vtisku.

Zkušební zařízení pro měření tvrdosti podle Vickerse se skládá ze tří částí. První část je zkušební přístroj podle normy ČSN EN ISO 6507 schopný vyvolat a stanovit zkušební zatížení v rozsahu  $49,03 \div 980,70 \text{ N}$ . Druhou částí je vnikací těleso, kterým je diamant ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem  $136^{\circ}$ . Podle normy ČSN EN ISO 6507. Poslední částí je měřicí zařízení, které musí odpovídat normě ČSN EN ISO 6507. Na sloupkovém stativu přístroje (Obr. 10) je nasunuto rameno, které nese zatěžovací zařízení, měřicí mikroskop a světelný zdroj. K výškovému nastavení ramene slouží kolečko. Nastavená poloha se zajišťuje druhým kolečkem. Zatěžování se provádí pákou, táhlem a tlačným šroubem, který tlačí na pružinu. Pružina působí na tlačný čep držáku diamantového jehlanu. Stlačením pružiny až k dorazu na matici je vyvozena předepsaná zatěžovací síla. Měřicí mikroskop je posuvný ve vodítku kolečkem po levé straně přístroje. Mikroskop a zatěžovací zařízení jsou vzájemně pevně spojeny a otočně umístěny na objímce stativu. Při vlastním měření tvrdosti je při natočení hlavy do jedné krajní polohy proveden vtisk, pak se celou hlavou pootočí do druhé krajní polohy a v mikroskopu se objeví vtisk. Mikrometrickým osovým křížem

v okuláru mikroskopu je možno změřit velikost úhlopříček. Zkoušený předmět se pokládá na podložku nebo se přístroj postaví přímo na zkoušený předmět a měření probíhá otvorem v podstavci s vyjmutou podložkou. (Veles 1989)



Obr. 10 Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Vickerse.

Výsledky naměřených hodnot se zapisují tímto způsobem: 82,8 HV 0,1 / 20. Před zkratkou HV se uvádí hodnota tvrdosti a následující čísla charakterizují, za jakých podmínek byla zkouška prováděna. 82,8 – tvrdost, HV – metoda měření podle Vickerse, 0, 1 – zkušební zatížení  $F = 0,981 \text{ N}$ , 20 – zatížení působilo 20 sekund.

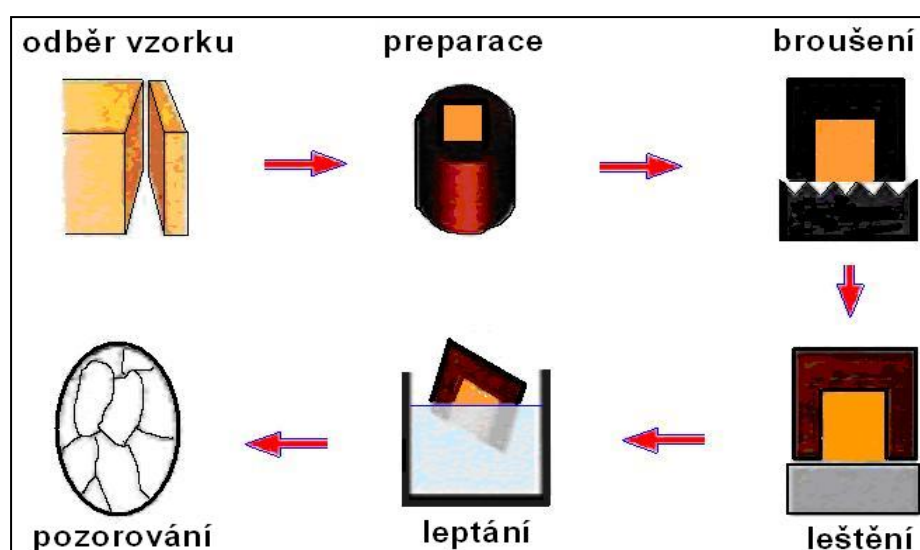
### 1.6.3. Kvantometr

Kvantometr slouží k rozborům kovových materiálů. Běžné rozborů chemického složení kovových materiálů provádíme na spektrometru (kvantometru) s doutnavým výbojem. Tímto přístrojem jsme schopni velmi rychle a přesně analyzovat nejen všechny druhy ocelí a litin, ale i slitiny barevných kovů, superslitiny na bázi Ni, slinuté karbidy i další speciální materiály (www.wikipedia.cz. 2009).



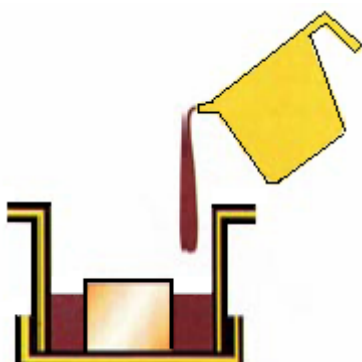
#### 1.6.4. Optická, elektronová metalografie

Optická metalografie je nauka, která se zabývá zkoumáním vnitřní stavby kovů a jeho slitin, má za cíl zviditelnění struktury materiálu k následné studii pomocí optického či elektronového mikroskopu. Můžeme sledovat a kontrolovat vlastnosti materiálu při výrobě a následném zpracování a umožňuje hledat příčiny vad materiálu nebo vysvětlit důvody selhání nějakého zařízení. Odebraný vzorek materiálu musí plně charakterizovat studovaný materiál. Minimální plocha pro vytvoření výbrusu je  $1\text{cm}^2$  (dle normy ČSN 420462). Postup odběru vzorku závisí na počáteční velikosti materiálu, z kterého odebíráme. Jedná-li se o velký kus materiálu, použijeme k rozdělení pilu a následně rozbrušovačku. Odebíraný vzorek nesmíme nijak tepelně ani mechanicky ovlivnit, aby nám při následné analýze nevyšly zkreslené výsledky. Postup přípravy vzorku (Obr. 11). Zobrazený postup přípravy je standardní, ale ne vždy ho striktně dodržujeme, některé materiály nám dovolují pozorovat povrch a strukturu, aniž bychom museli leptat.

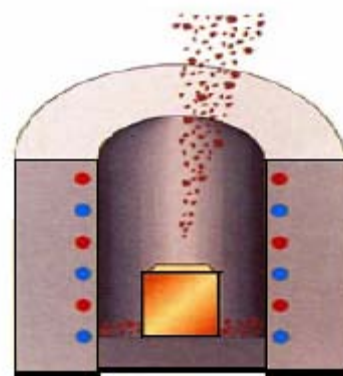


Obr. 11 Postup přípravy vzorku pro optickou metalografii

Následná preparace slouží pro lepší manipulaci s malými částmi materiálu. Používáme dva druhy preparací, za studena a za tepla. Preparaci za studena (Obr. 12) používáme u vzorků náchylných ke změnám struktury za vyšších teplot. Vzorek zalijeme kapalinou, která poté ztuhne. Preparace za tepla (Obr. 13) spočívá v zasypání vzorku v tlakové nádobě speciálním práškem, který se roztaví a dokonale obklopí studovaný vzorek.



Obr. 12 Preparace za studena

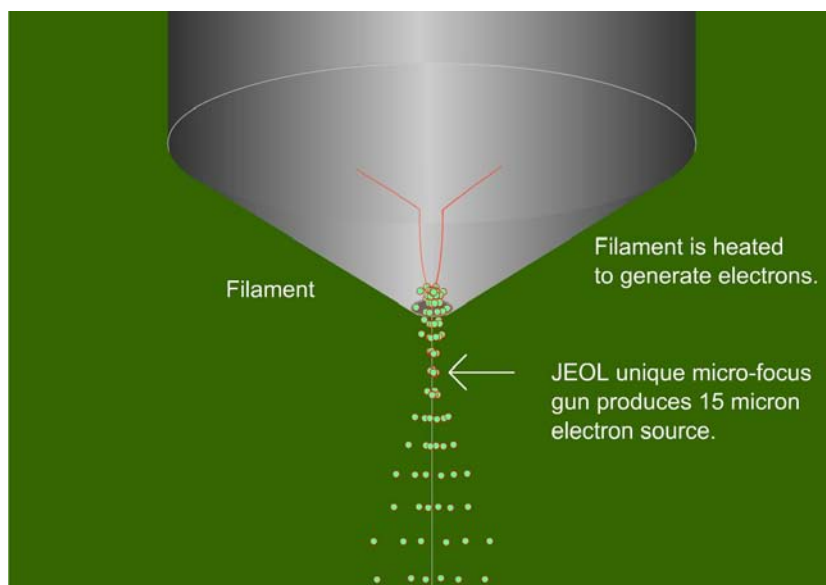


Obr. 13 Preparace za tepla

Další operací v přípravě vzorku pro pozorování je broušení. Je to intenzivní odebrání plochy z materiálu s cílem dosáhnout rovinného povrchu vzorku s minimálním poškozením. Brousit můžeme ručně nebo strojně. Nejčastěji používaným typem brusiva je SiC, ZrO<sub>2</sub>, C (diamant). Největší vliv na broušení má druh povrchu brusného kotouče, na kterém je brusný papír s různou zrnitostí. Podle velikosti zrn brusiva rozlišujeme broušení na velmi hrubé, hrubé, jemné a velmi jemné. Velikost síly, kterou působíme na vzorek, by se měla pohybovat v rozmezí 1 -100 N. Rychlost otáčení kotouče je v běžné praxi v rozmezí 30 -150 otáček za minutu. Dále záleží na použitém smáčedle a chladicím médiu, protože při broušení na povrchu vzniká souvislá vrstva tvářeného kovu, která se nazývá Beilbyho vrstva. V této vrstvě materiál částečně ztrácí původní strukturu. Po broušení musíme vzorek leštit, ale na rozdíl od broušení, při leštění již materiál z povrchu vzorku neubývá. Leštit můžeme mechanicky. Princip je podobný mechanismu broušení, vzorek se vystavuje působení tlaku na rotující kotouč s leštícím materiálem. Mechanické leštění ovlivňují stejné faktory jako při broušení. Na měkčí materiály jako je hliník, používáme leštění elektrolytické. Principem je elektrolytické rozpouštění. Výhodou této metody je, že nevzniká Beilbyho vrstva. Poslední část přípravy vzorku je leptání. Pomůže nám zviditelnit strukturu. Na hranicích zrn leptadlo vytváří prohloubeniny, ty pak můžeme pozorovat díky dopadajícím paprskům, které vytváří na hranicích zrn stíny (Veles 1989).

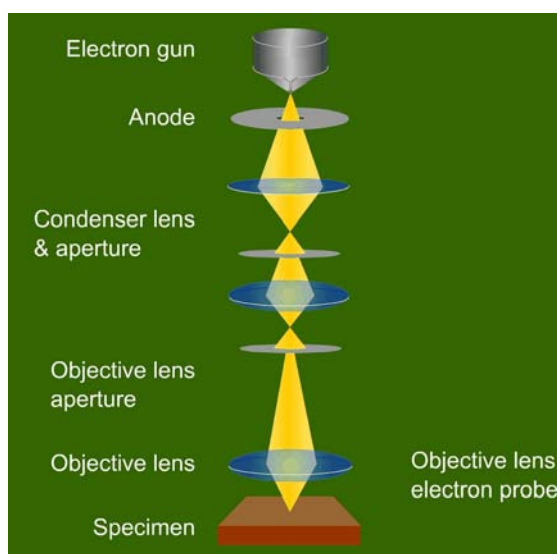
Na závěr pozorujeme strukturu na optickém či elektronovém mikroskopu. Optický metalografický mikroskop k zobrazení se využívá odraženého světla od vyleštěného povrchu vzorku, obsahuje zdroj světla a dvě základní soustavy čoček, objektiv a okulár. Rozlišovací schopnost  $d$  je nejmenší vzdálenost dvou bodů, které jsou rozlišitelné ve zvětšeném obraze.

Rastrovací elektronový mikroskop (REM) využívá k zobrazování pohyblivého svazku elektronů, má vysokou rozlišovací schopnost a velkou hloubku ostrosti obrazu, což působí 3D vzhled obrazu. Princip činnosti REM spočívá v úzkém svazku elektronů, který je emitován z žhavené wolframové katody a urychlován v elektronové trysce tzv. Wehneltově válci (Obr.14).



Obr. 14 Wehneltův válec.

Paprsek je usměrněn elektromagnetickými čočkami. Usměrněný paprsek rastruje po povrchu vzorku (Obr.15).



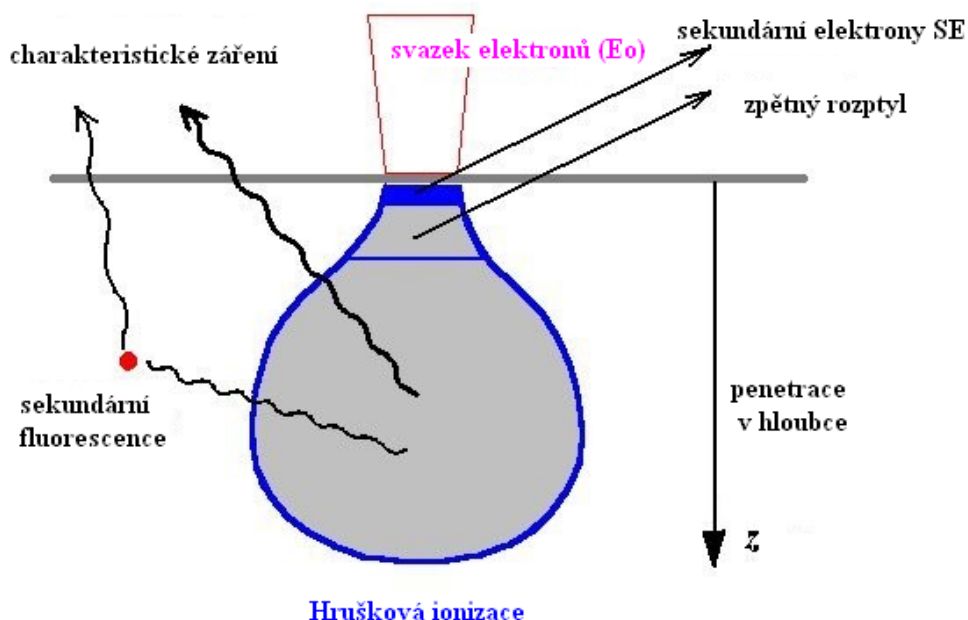
Obr. 15. Princip rastrovacího elektronového mikroskopu.

Získání obrazu ve skanovacím elektronovém mikroskopu je založeno na interakci primárního svazku s povrchem prohlíženého objektu. Každý produkt této interakce přináší informaci o fyzikálních a chemických vlastnostech zkoumaného objektu, které lze využít, pokud je mikroskop vybaven detekčním čidlem, které dokáže účinně a selektivně tento signál zachytit.

Důležitý je tzv. excitační objem, představující oblast pod povrchem preparátu, ve které dochází k brzdění primárních elektronů a vzniku jednotlivých signálů. Interakce mezi primárními elektrony a atomy preparátu (Obr. 16) můžeme rozdělit do dvou skupin: elastické kolize, které mají na svědomí vznik zpětně odražených elektronů a neelastické, při kterých dochází k předávání energie primárních elektronů atomům vzorku a následně k uvolnění sekundárních a Augerových elektronů, rtg. záření a katodoluminiscenci. Energie primárních elektronů, daná použitým urychlovacím napětím, ovlivňuje tvar excitačního objemu, který se s klesající hodnotou  $U$  stává mělčí a oblast, ze které se uvolňují sekundární elektrony, pak neodpovídá průměru svazku primárních elektronů. Toto zvětšení oblasti, ze které se uvolňují sekundární elektrony, je další příčinou snížení rozlišovací schopnosti mikroskopu při poklesu urychlovacího napětí. Na hloubku penetrace primárních elektronů má dále vliv i složení preparátu, je zřejmé, že preparát tvořený těžšími prvky (např. kovy) bude produkovat více odražených elektronů než preparát tvořený lehkými prvky a hloubka průniku primárních elektronů bude menší. Je zde jasně určená závislost vzniku zpětně odražených elektronů na středním atomovém čísle preparátu.

K zobrazení povrchu preparátu se v SEM využívají sekundární elektrony. Od zpětně odražených elektronů se odlišují svojí nízkou energií a rychlostí. Aby byly schopné dostat se k detektoru sekundárních elektronů, je třeba je přitáhnout mřížkou s předpětím okolo 10 kV. Jas paprsku synchronně rastrujícího po obrazovce je přímo úměrný signálu z detektoru sekundárních elektronů. Vzhledem k nízké energii sekundárních elektronů se z vyvýšenin na povrchu preparátu dostane do detektoru více sekundárních elektronů a výsledkem je vyšší intenzita signálu z detektoru a tedy světlé místo na obrazovce, z prohlubenin je tomu naopak. Tím je získán topografický kontrast, který umožňuje zobrazit v mnohonásobném zvětšení povrch vzorku. Produkce odražených elektronů, jak bylo zmíněno výše, závisí na středním atomovém čísle vzorku. Z toho plyne, že jako světlé oblasti se budou na obrazovce

jevit místa s vyšším středním atomovým číslem, tedy tvořená těžšími prvky. Naopak, oblasti tvořené lehkými prvky se budou jevit jako tmavá místa. Obraz v odražených elektronech je schopen odlišit oblasti s různým prvkovým složením (www.wikipedia.cz. 2009).



Obr. 16 Interakce elektronů s pevnou látkou-interakční oblast.

## **2. PRAKTICKÁ ČÁST**

### **2.1. Odebrání vzorků**

Vzorky, na kterých bylo prováděno měření byly odebrány 8. 4. 2009 ze tří bloků motoru 1,2 HTP se zalitými vložkami a odlité hned po sobě v intervalu 2 minut na stroji s označením OL 2000 Stroj pracuje s uzavírací silou 2000 tun) od italského výrobce IDRA. Následné pomalé zchladnutí trvalo přibližně dvě hodiny.

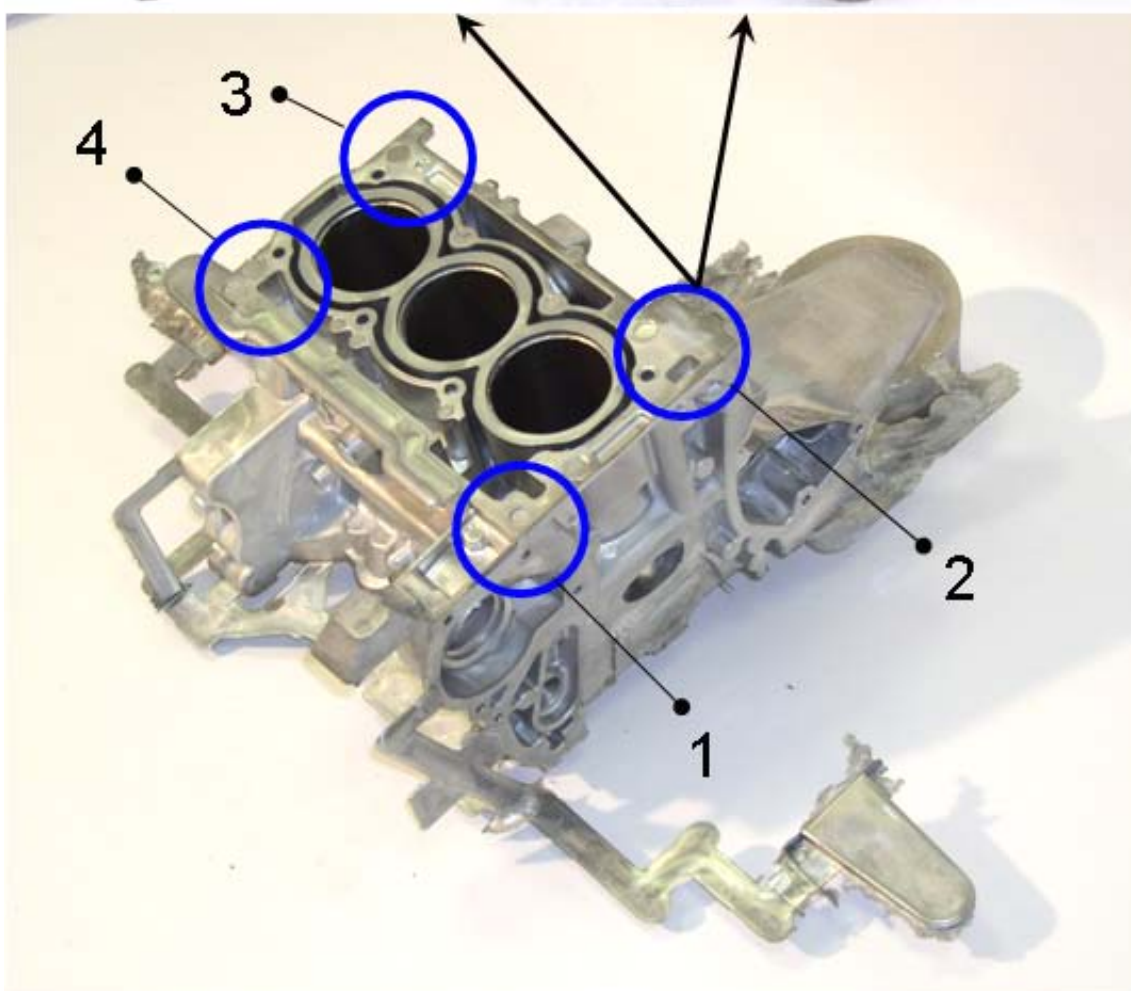
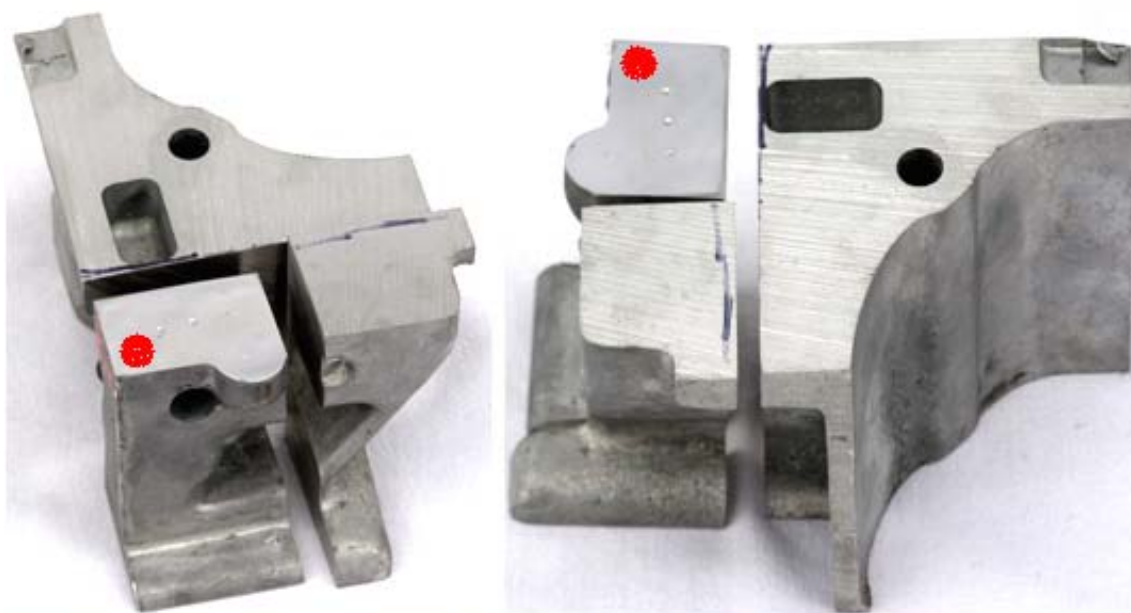
### **2.2. Definování míst analýzy**

Z každého bloku jsem odebral 8 vzorků, z toho 4 vzorky byly z horní části bloku místo A (pod hlavou) (Obr. 17). Získaný vzorek je červeně označen. Zbylé 4 vzorky ze spodní části bloku místo B (kde jsou ložiska na podepření klikového hřídele) za použití technologie Squeeze-Casting (Obr. 18). Získaný vzorek je červeně označen. Pro orientaci v odebraných kusech jsem si zvolil jednoduché značení vzorků, např: 1.2. = 1– blok číslo jedna. 2 – vzorek z místa dvě.

K získání jednotlivých vzorků bylo použito několik strojů. Nejhrubší rozdělení odlitku probíhalo na pásové pile ve ŠKODA - Auto Mladá Boleslav, tyto kusy odlitku jsem dále dělil již v laboratoři Technické univerzity Liberec (TUL) na rozbrušovací pile (Obr. 19). Po rozřezání následovalo broušení a leštění a po každém kroku byl proveden dokonalý oplach vodou a výměna brusných papírů. Vyleštěné výbrusy (Obr. 20.) byly opláchnuty lihem a vysušeny.

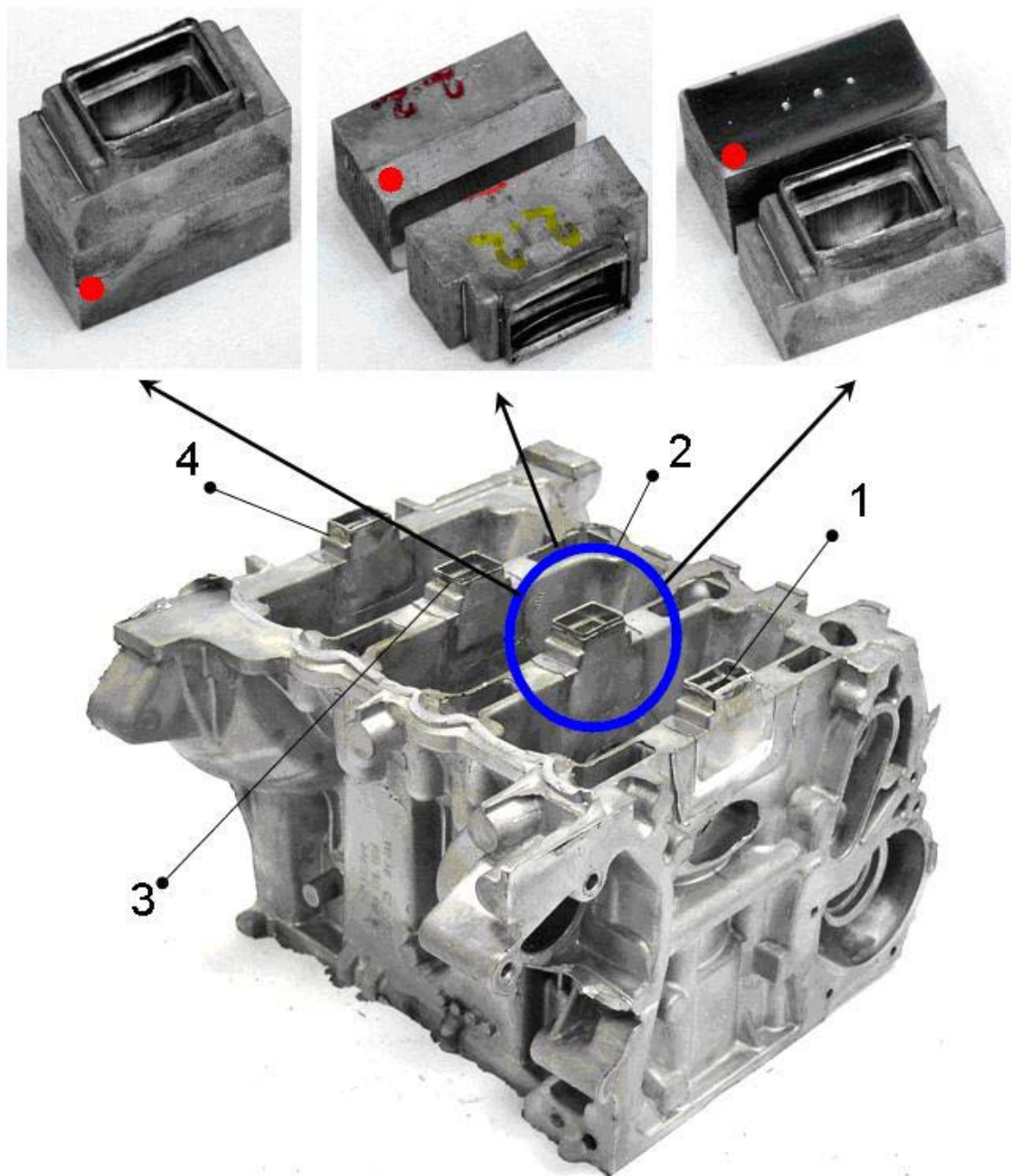
### **2.3. Praktická část - experimenty**

Na vyleštěných vzorcích byla následně prováděna zkouška tvrdosti podle Brinella, zkouška tvrdosti podle Vickerse a metalografické hodnocení struktury a pórovitosti pomocí optického a elektronového mikroskopu.



Obr. 17 Postup odběru vzorků z místa A (pod hlavou) bez aplikace Squeeze – Casting a značení jednotlivých vzorků.



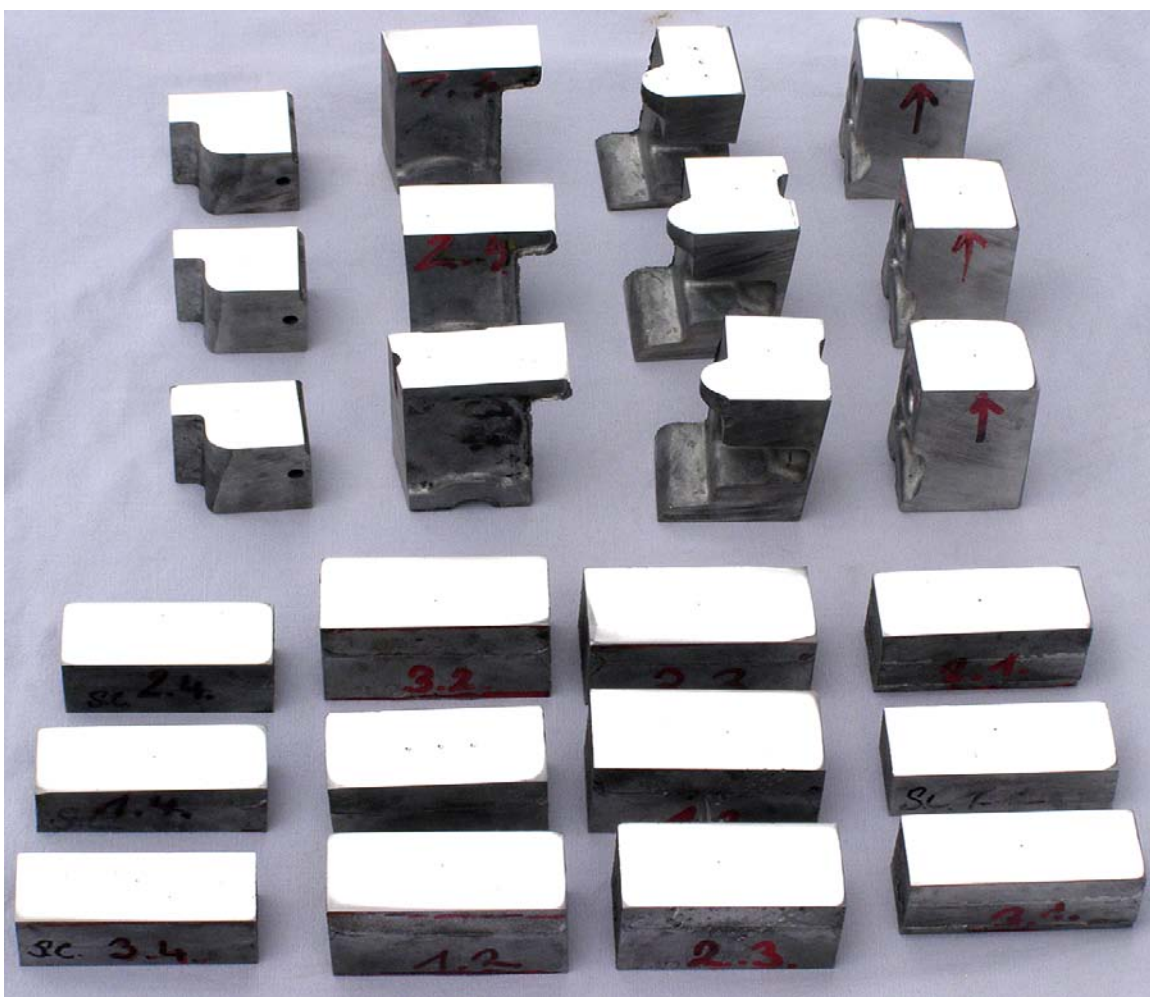


Obr. 18 Postup odběru vzorků z místa B (spodní část) s použitím aplikace Squeeze – Casting a značení jednotlivých vzorků.





Obr. 19. Rozbrušovací pila v laboratoři TUL



Obr. 20 Hotové zkušební vzorky.

### 2.3.1. Měření tvrdosti

Tvrdost materiálu byla měřena Brinellovým tvrdoměrem HPO 250 Výrobce WPM Lipsko (Obr. 21). Byla použita kulička o průměru 2,5 mm a velikost zatížení  $F = 612,9 \text{ N}$  po dobu 40 sekund. Tvrdost byla změřena na všech vyleštěných vzorcích a na každém vzorku byly provedeny tři vtisky. Hodnoty naměřené tvrdosti, včetně aritmetického průměru vtisků, jsou uvedeny v tabulkách 2 a 3 a grafu 1. Pro přesné zjištění hodnot tvrdosti se zkouška provedla i metodou Vickers. Doba zatížení byla 20 sekund, velikost zatížení  $F = 0,981 \text{ N}$  a použité zvětšení mikroskopu 40x. Měření bylo prováděno na mikrotvrdoměru Buehler (Obr. 22). Tvrdost byla změřena na všech vyleštěných vzorcích a na každém vzorku byly provedeny čtyři vtisky. Hodnoty naměřené tvrdosti, včetně aritmetického průměru vtisků, jsou uvedeny v tabulkách 4 a 5 a grafu 2.



Obr. 21. Tvrdoměr HPO 250.



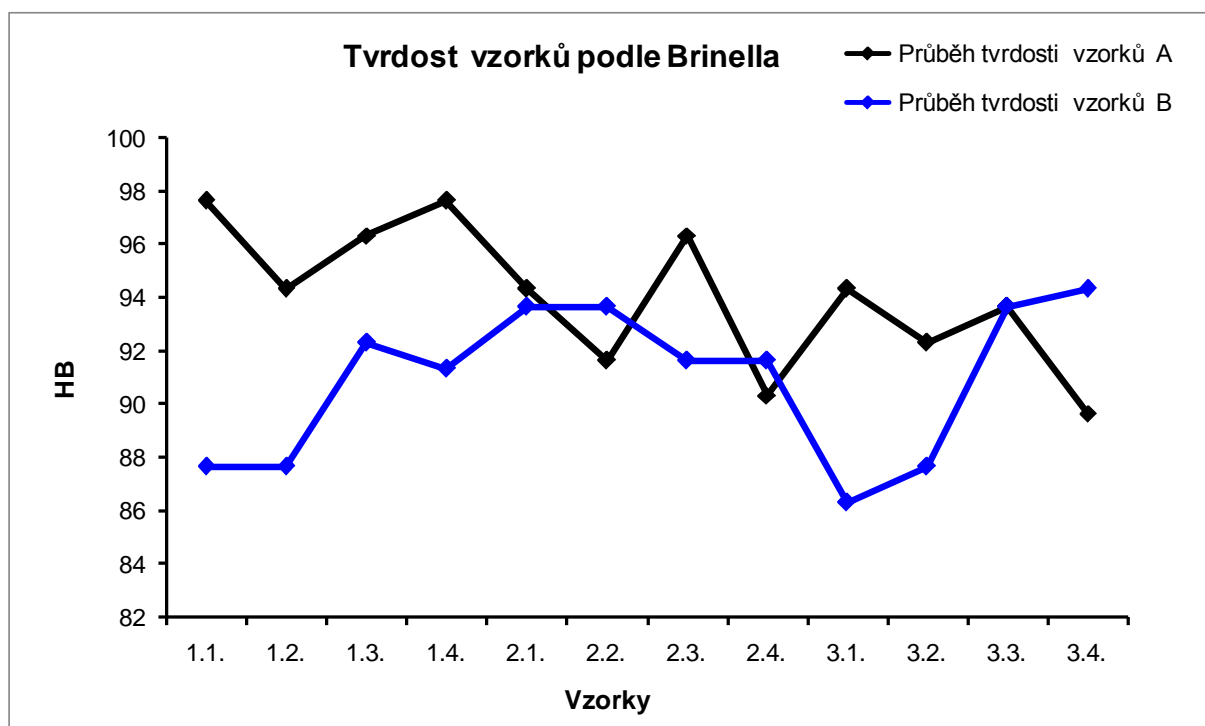
Obr. 22 Mikrotvrdoměr Buehler.

| Číslo vzorku z místa odběru A (bez aplikace Squeezeu) | 1. vtisk [HB] | 2. vtisk [HB] | 3. vtisk [HB] | Průměr hodnot | Směrodatná odchylka |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| 1.1.  | 97,0          | 97,0          | 99,0          | 97,7          | 0,9                 |
| 1.2.  | 95,0          | 93,0          | 95,0          | 94,3          | 0,9                 |
| 1.3.  | 97,0          | 97,0          | 95,0          | 96,3          | 0,9                 |
| 1.4.  | 97,0          | 99,0          | 97,0          | 97,7          | 0,9                 |
| 2.1.  | 95,0          | 93,0          | 95,0          | 94,3          | 0,9                 |
| 2.2.  | 91,0          | 93,0          | 91,0          | 91,7          | 0,9                 |
| 2.3.  | 97,0          | 97,0          | 95,0          | 96,3          | 0,9                 |
| 2.4.  | 89,0          | 91,0          | 91,0          | 90,3          | 0,9                 |
| 3.1.  | 95,0          | 93,0          | 95,0          | 94,3          | 0,9                 |
| 3.2.  | 91,0          | 93,0          | 93,0          | 92,3          | 0,9                 |
| 3.3.  | 93,0          | 93,0          | 95,0          | 93,7          | 0,9                 |
| 3.4.  | 89,0          | 89,0          | 91,0          | 89,7          | 0,9                 |

Tab. 2 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků A podle Brinella, odebraných v horní části bloku motoru (pod hlavou), u kterých nebyla použita metoda Squeeze-Casting.

| Číslo vzorku z místa odběru B (s aplikací Squeezeu) | 1. vtisk [HB] | 2. vtisk [HB] | 3. vtisk [HB] | Průměr hodnot | Směrodatná odchylka |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| 1.1.  | 89,0          | 87,0          | 87,0          | 87,7          | 0,9                 |
| 1.2.  | 87,0          | 87,0          | 89,0          | 87,7          | 0,9                 |
| 1.3.  | 92,0          | 92,0          | 93,0          | 92,3          | 0,5                 |
| 1.4.  | 91,0          | 92,0          | 91,0          | 91,3          | 0,5                 |
| 2.1.  | 95,0          | 93,0          | 93,0          | 93,7          | 0,9                 |
| 2.2.  | 93,0          | 95,0          | 93,0          | 93,7          | 0,9                 |
| 2.3.  | 91,0          | 93,0          | 91,0          | 91,7          | 0,9                 |
| 2.4.  | 91,0          | 91,0          | 93,0          | 91,7          | 0,9                 |
| 3.1.  | 85,0          | 85,0          | 89,0          | 86,3          | 1,9                 |
| 3.2.  | 89,0          | 89,0          | 85,0          | 87,7          | 1,9                 |
| 3.3.  | 93,0          | 95,0          | 93,0          | 93,7          | 0,9                 |
| 3.4.  | 95,0          | 93,0          | 95,0          | 94,3          | 0,9                 |

Tab. 3 Hodnoty tvrdosti vzorků B podle Brinella, odebraných ve spodní části bloku motoru, u kterých byla použita metoda Squeeze-Casting.



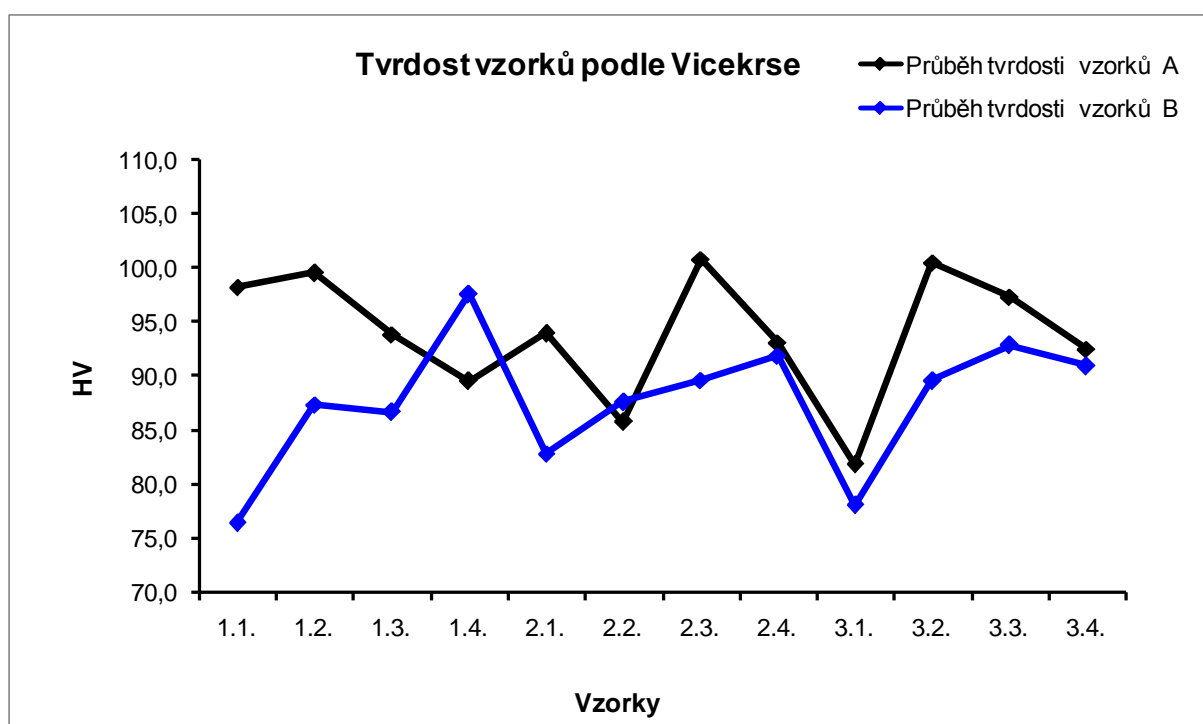
Graf 1 Průběh tvrdosti vzorků A a B podle Brinella.

| Číslo vzorku z místa odběru A (bez aplikace Squeezu) | 1. vtisk [HV] | 2. vtisk [HV] | 3. vtisk [HV] | 4. vtisk [HV] | Průměr hodnot | Směrodatná odchylka |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| 1.1.   | 102,1         | 101,2         | 94,2          | 95,6          | 98,3          | 3,4                 |
| 1.2.   | 88,8          | 99,2          | 98,8          | 111,5         | 99,6          | 8,0                 |
| 1.3.   | 102,1         | 91,6          | 85,4          | 96,5          | 93,9          | 6,2                 |
| 1.4.   | 96,0          | 81,0          | 90,9          | 90,4          | 89,6          | 5,4                 |
| 2.1.   | 90,5          | 92,1          | 96,5          | 96,9          | 94,0          | 2,8                 |
| 2.2.   | 84,2          | 86,1          | 90,4          | 82,4          | 85,8          | 3,0                 |
| 2.3.   | 96,5          | 104,1         | 100,7         | 102,1         | 100,9         | 2,8                 |
| 2.4.   | 90,4          | 95,6          | 95,6          | 90,9          | 93,1          | 2,5                 |
| 3.1.   | 82,8          | 79,3          | 94,3          | 71,2          | 81,9          | 8,3                 |
| 3.2.   | 99,2          | 99,2          | 103,6         | 100,2         | 100,6         | 1,8                 |
| 3.3.   | 100,2         | 93,0          | 101,1         | 95,1          | 97,4          | 3,4                 |
| 3.4.   | 91,3          | 94,7          | 87,6          | 96,5          | 92,5          | 3,4                 |

Tab. 4 Hodnoty mikrotvrdosti vzorků A podle Vickerse, odebraných v horní části bloku motoru (pod hlavou), u kterých nebyla použita metoda Squeeze-Casting.

| Číslo vzorku z místa odběru B (s aplikací Squeezeu) | 1. vtisk [HV] | 2. vtisk [HV] | 3. vtisk [HV] | 4. vtisk [HV] | Průměr hodnot | Směrodatná odchylka |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| 1.1.  | 74,8          | 78,6          | 73,3          | 79,3          | 76,5          | 2,5                 |
| 1.2.  | 89,2          | 85,0          | 88,4          | 86,9          | 87,4          | 1,6                 |
| 1.3.  | 84,6          | 88,8          | 79,3          | 94,2          | 86,7          | 5,5                 |
| 1.4.  | 97,8          | 106,7         | 90,0          | 96,0          | 97,6          | 6,0                 |
| 2.1.  | 79,3          | 88,4          | 83,1          | 80,7          | 82,9          | 3,5                 |
| 2.2.  | 86,5          | 89,6          | 86,9          | 87,6          | 87,7          | 1,2                 |
| 2.3.  | 85,7          | 89,2          | 91,7          | 92,1          | 89,7          | 2,5                 |
| 2.4.  | 90,4          | 91,7          | 101,0         | 84,6          | 91,9          | 5,9                 |
| 3.1.  | 76,7          | 75,1          | 76,0          | 84,6          | 78,1          | 3,8                 |
| 3.2.  | 85,0          | 89,6          | 86,5          | 97,4          | 89,6          | 4,8                 |
| 3.3.  | 95,6          | 89,2          | 92,1          | 94,6          | 92,9          | 2,5                 |
| 3.4.  | 89,6          | 91,7          | 90,5          | 92,1          | 91,0          | 1,0                 |

Tab. 5 Hodnoty mikrotvrdosti vzorků B podle Vickerse, odebraných ve spodní části bloku motoru, u kterých byla použita metoda Squeeze-Casting.

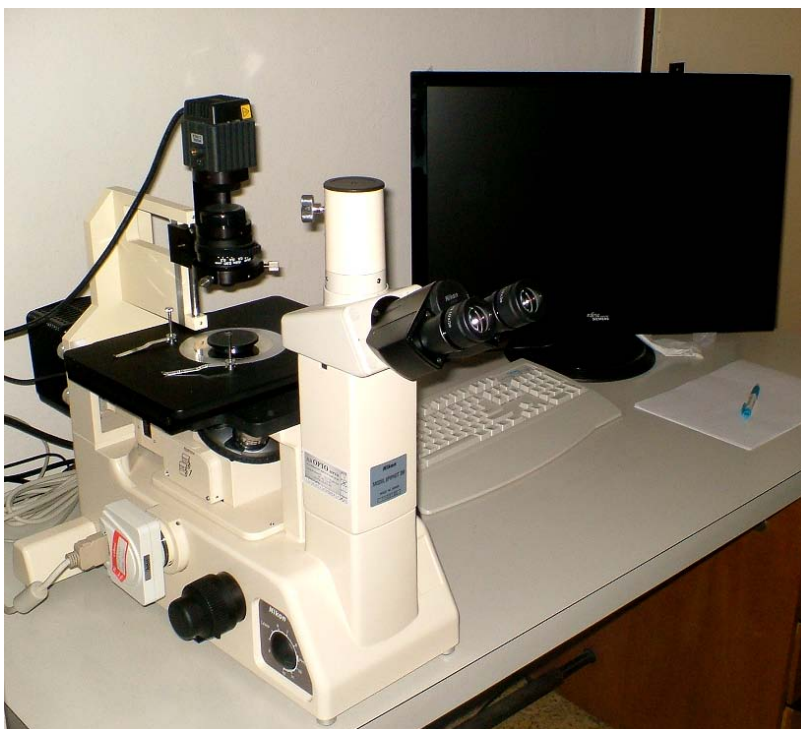


Graf 2 Průběh tvrdosti vzorků A a B podle Vickerse.

### 2.3.2. Metalografie

K hodnocení byl použit optický metalografický mikroskop EIPHOT 200 od firmy Nikon (Obr. 23). a dále rastrovací elektronový mikroskop TESCAN – VEGA XMU.

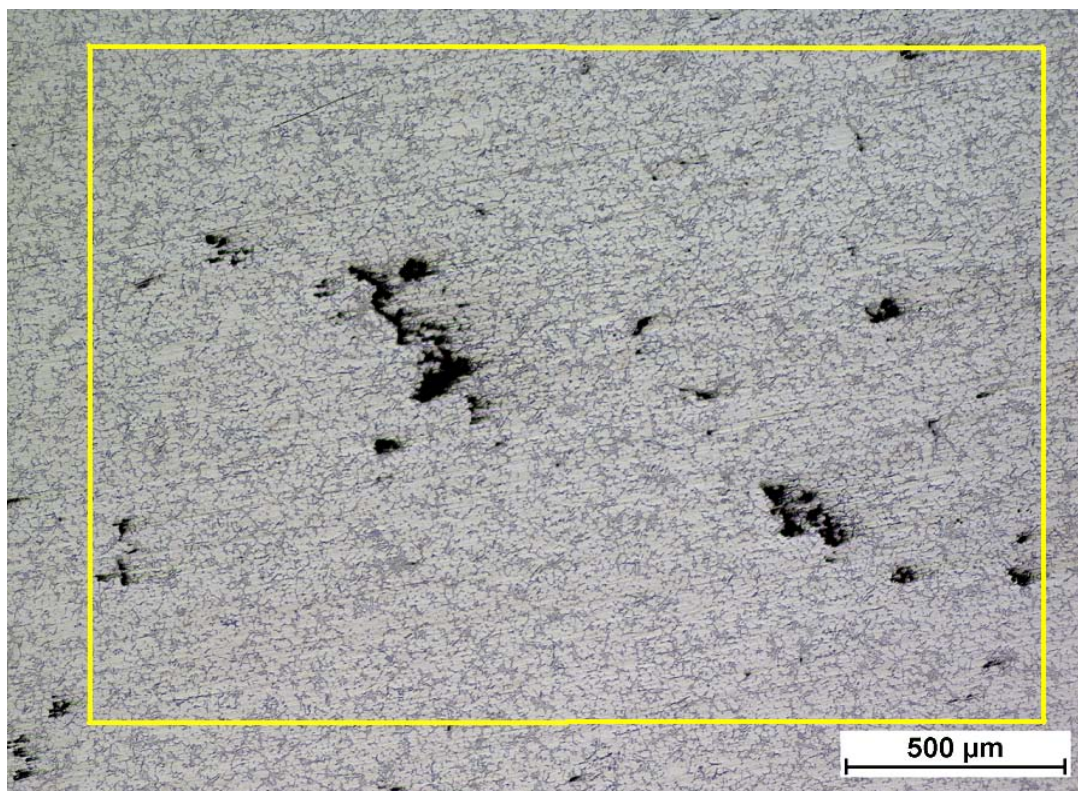
Byla hodnocena pórovitost všech 24 vyleštěných vzorků pomocí programu NIS – Elements. U každého vzorku při zvětšení povrchu 50x byl přesně vytyčen rámeček (Obr.24 a 25) stejné plochy pro každý vzorek, následovalo označení pórů (Obr.25.) a procentuelní vyhodnocení pórovitosti (Tab. 6 a 7) u daného rámečku.



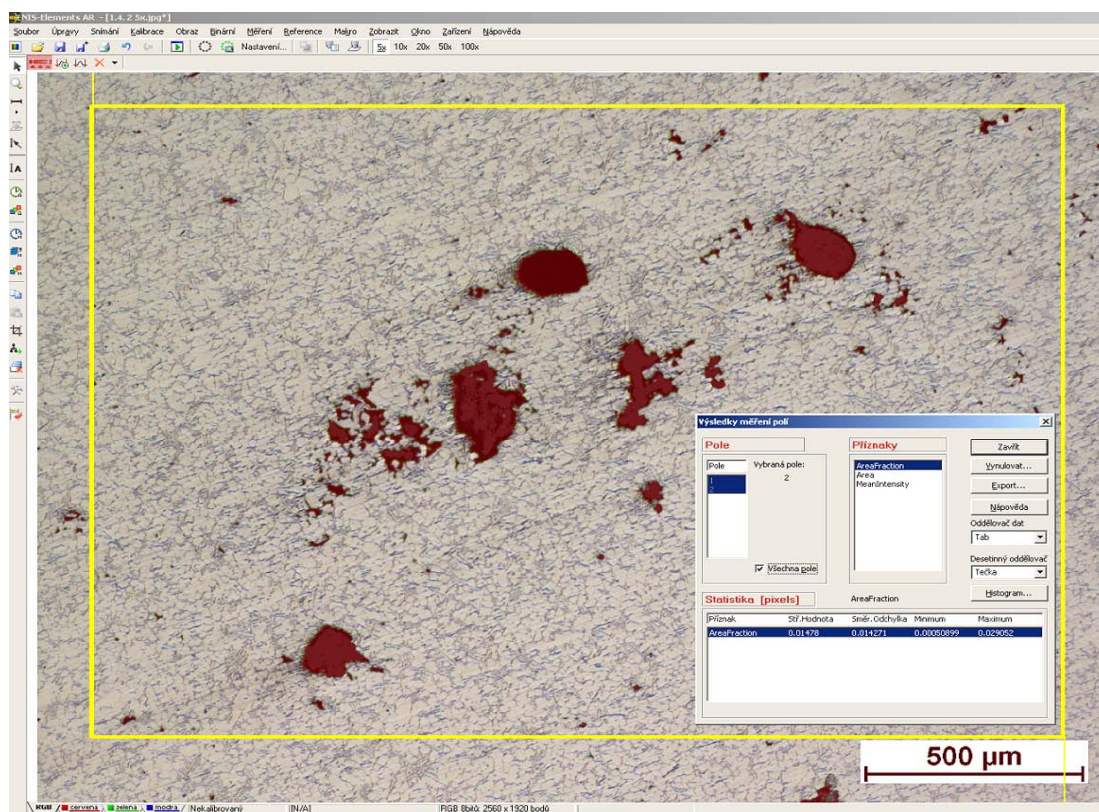
Obr. 23 Metalografický optický mikroskop EIPHOT 200

Mikrostruktura slitiny  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  je tvořena dendrity tuhého roztoku  $\alpha$  a eutektikem, které je vyloučeno v mezidendritických prostorech. Struktura materiálu, tvar a velikost dendritů fáze  $\alpha$  je ovlivněna podmínkami při krystalizaci taveniny. Tlak způsobuje snížení kritické velikosti zárodků a intenzivnější odvod tepla, což má za důsledek jemnější strukturu materiálu. Dochází ke zkrácení doby tuhnutí odlitku a k eliminaci výskytu vzduchové mezery, čímž se potlačí vznik vnitřních vad.





Obr. 24 Rámeček pro hodnocení pórovitosti.



Obr. 25 Rámeček pro hodnocení pórovitosti – označené póry.

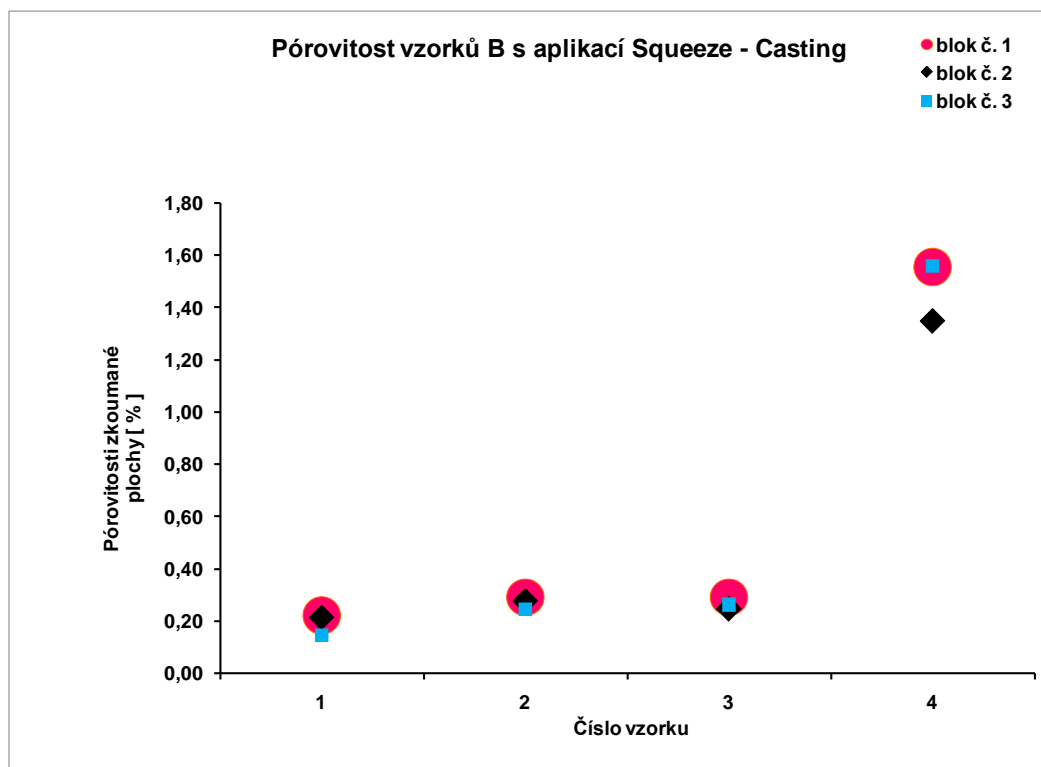
| Číslo vzorku z místa odběru A (bez aplikace Squeezu) | Pórovitost [%] |               |               |               |                     |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
|  | první rámeček  | druhý rámeček | třetí rámeček | Průměr hodnot | Směrodatná odchylka |
| 1.1.   | 0,260          | 0,360         | 0,340         | 0,320         | 0,043               |
| 1.2.   | 0,140          | 0,210         | 0,110         | 0,153         | 0,042               |
| 1.3.   | 0,270          | 0,180         | 0,250         | 0,233         | 0,039               |
| 1.4.   | 0,090          | 0,070         | 0,050         | 0,070         | 0,016               |
| 2.1.   | 0,320          | 0,220         | 0,280         | 0,273         | 0,041               |
| 2.2.   | 0,210          | 0,130         | 0,150         | 0,163         | 0,034               |
| 2.3.   | 0,240          | 0,140         | 0,210         | 0,197         | 0,042               |
| 2.4.   | 0,060          | 0,055         | 0,085         | 0,067         | 0,013               |
| 3.1.   | 0,170          | 0,330         | 0,240         | 0,247         | 0,065               |
| 3.2.   | 0,220          | 0,160         | 0,180         | 0,187         | 0,025               |
| 3.3.   | 0,250          | 0,140         | 0,170         | 0,187         | 0,046               |
| 3.4.   | 0,048          | 0,070         | 0,064         | 0,061         | 0,009               |

Tab. 6 Hodnoty pórovitosti v %.

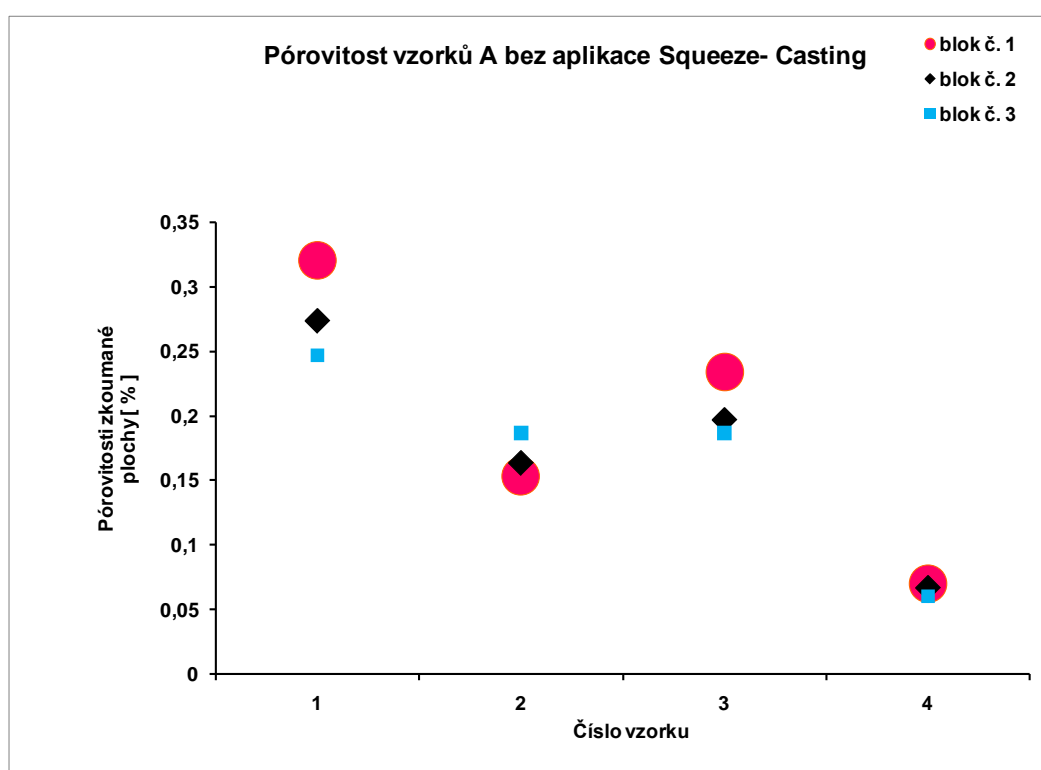
| Číslo vzorku z místa odběru B (s aplikací Squeezu) | Pórovitost [%] |               |               |               |                     |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
|  | první rámeček  | druhý rámeček | třetí rámeček | Průměr hodnot | Směrodatná odchylka |
| 1.1.   | 0,18           | 0,23          | 0,25          | 0,22          | 0,03                |
| 1.2.   | 0,28           | 0,26          | 0,33          | 0,29          | 0,03                |
| 1.3.   | 0,24           | 0,32          | 0,31          | 0,29          | 0,04                |
| 1.4.   | 1,46           | 1,63          | 1,58          | 1,56          | 0,07                |
| 2.1.   | 0,15           | 0,26          | 0,23          | 0,21          | 0,05                |
| 2.2.   | 0,31           | 0,24          | 0,28          | 0,28          | 0,03                |
| 2.3.   | 0,28           | 0,21          | 0,25          | 0,25          | 0,03                |
| 2.4.   | 1,44           | 1,22          | 1,39          | 1,35          | 0,09                |
| 3.1.   | 0,11           | 0,14          | 0,19          | 0,15          | 0,03                |
| 3.2.   | 0,32           | 0,16          | 0,26          | 0,25          | 0,07                |
| 3.3.   | 0,3            | 0,21          | 0,28          | 0,26          | 0,04                |
| 3.4.   | 1,58           | 1,46          | 1,64          | 1,56          | 0,07                |

Tab. 7 Hodnoty pórovitosti v %.

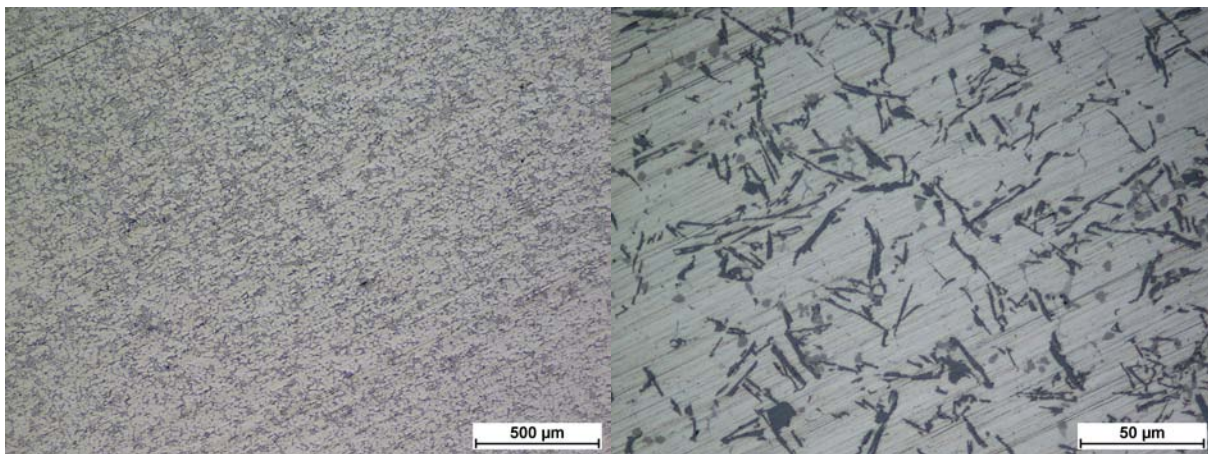




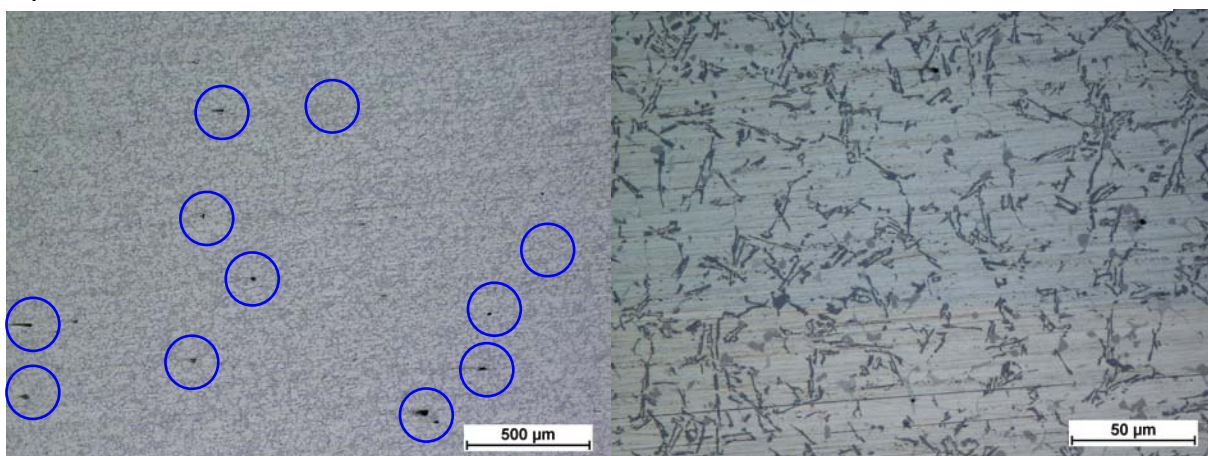
Graf 3 Pórovitost jednotlivých zkušebních vzorků s aplikací Squeeze- Casting.



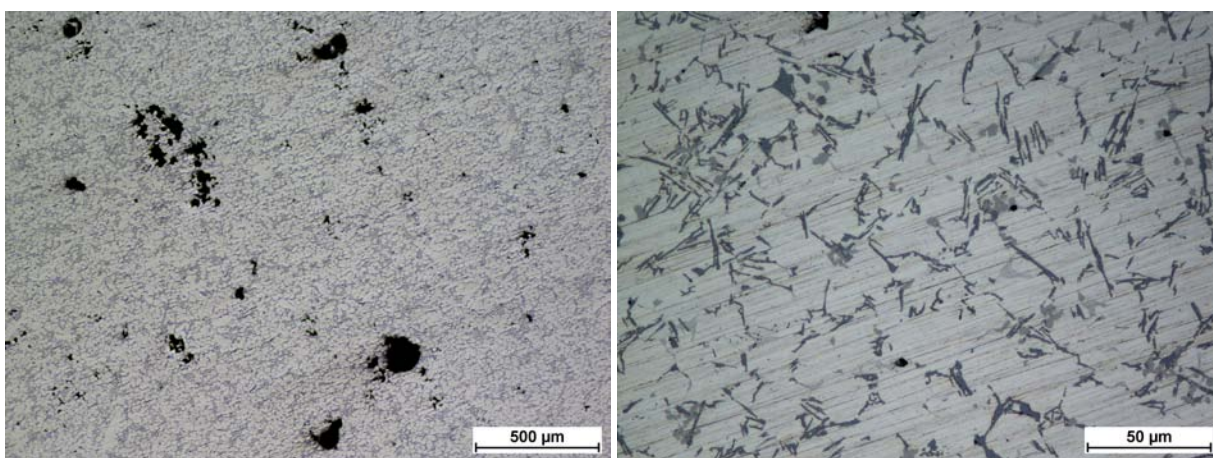
Graf 4 Pórovitost jednotlivých zkušebních vzorků bez aplikace Squeeze- Casting.



Obr. 26-27 Mikrostruktura se Squeeze – Casting. při zvětšení 50x a 500x. Je patrné velké množství pórů v důsledku malého tlaku vyvinutého razníkem squeezeu.



Obr. 28-29 Mikrostruktura bez Squeeze – Casting ze vzorku odebraného z místa A pod hlavou bloku motoru při zvětšení 50x a 500x. Jemnozrnná struktura s malým množstvím pórů vznikla z důvodu rychlého odvodu tepla do těla formy, vzniklá mikrostruktura je podobná jako u obr. 26 a 27.

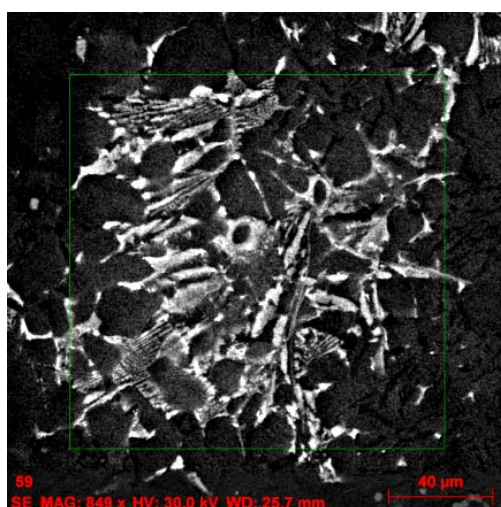


Obr. 30-31 Mikrostruktura se Squeeze – Casting při zvětšení 50x a 500x. Je zde zřetelná vysoká pórovitost daného vzorku způsobená nefunkčností squeezeového razníku.





Obr. 32 Mikrostruktura slitiny hliníku  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ .



Obr. 33 Mikrostruktura slitiny hliníku  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$ .

### 2.3.3. Kvantometr

Kontrola chemického složení (Tab. 8) na kvantometru QUANTRON Magellan (Obr.35) byla provedena na vzorku (Obr.34) odebraného přímo z udržovací pece stroje, na kterém byly odlity zkušební bloky motoru.

| Prvek       | Si               | Cu         | Mg           | Mn           | Fe   | Zn   | Pb    | Sn    | Ti    | Ni    | Cr    |
|-------------|------------------|------------|--------------|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Předpis     | 8,5<br>÷<br>10,0 | 2<br>÷ 3,5 | 0,1<br>÷ 0,5 | 0,1<br>÷ 0,4 | ≥1   | ≥1,2 | ≥0,2  | ≥0,1  | ≥0,15 | ≥0,3  | ≥0,05 |
| Vzorek<br>1 | 8,95             | 2,35       | 0,19         | 0,22         | 0,68 | 0,82 | 0,065 | 0,028 | 0,036 | 0,046 | 0,03  |

Tab. 8. Chemické složení v % slitiny  $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$  předpis ŠKODA-Auto Mladá Boleslav



Obr. 34 Vzorek k chemické analýze



Obr. 35 Kvantometr QUANTRON Magellan.

## 2.4. Zhodnocení výsledků

Měření bylo prováděno na 24 vzorcích, které byly odebrány z různých míst odlitku bloku motoru 1.2 HTP. 12 vzorků odebraných z horní části (A) bloku, tzv. místo pod hlavou a zbylých 12 odebráno ze spodní části (B) odlitku v místech, kde je uložen klikový hřídel na ložiscích, která tuhla pod tlakem (Squeeze-Casting). Původní předpoklad byl takový, že vzorky odebrané z místa A budou vykazovat horší mechanické vlastnosti, než vzorky B, na kterých byla aplikována metoda tuhnutí pod tlakem. Po změření tvrdosti se ukázalo, že vzorky z místa A mají stejnou a v několika případech i vyšší tvrdost než vzorky z místa B. Výsledek byl potvrzen oběma metodami měření tvrdosti. Příčina byla zjištěna až na simulaci tuhnutí odlitku, která ukázala, že v horní části bloku dochází k vysoké intenzitě ochlazení, jehož důsledkem je vysokou tvrdost a relativně nízkou pórovitost. Vzorky B naopak tuhnou pomaleji, protože nepřijdou do přímého kontaktu se stěnou formy, ovšem je tu riziko vysoké pórovitosti a vzniku staženin, jak bylo patrné ze snímků pořízených mikroskopem EPIPHOT 200. Aby se předešlo těmto nežádoucím jevům, je do odlitku v průběhu tuhnutí, kdy slitina má již kašovitou konzistenci vsunut speciální razník, který nám zvýší v daném místě tlak a dopěchuje slitinu do formy a zároveň působí až do úplného ztuhnutí odlitku. U odlitku bloku byly použity 4 razníky, každý působil v místě ložiska klikového hřídele. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaneseny do grafů č. 1 a 2. Z hlediska tvrdosti nebyly zjištěny žádné extrémní výchyly.

Při vyhodnocování snímků mikrostruktury bylo určeno procentuelní zastoupení pórů v přesně dané ploše. Zde se ukázalo, že vzorky odebrané z místa A mají podobnou pórovitost jako 9 vzorků ze 12 odebraných z místa B. Zbylé tři vzorky ze stejného místa odběru na jednotlivých blocích vykazovaly několikanásobně vyšší pórovitost, která byla způsobena nefunkčností jednoho z razníků squeeze. V důsledku vysokého procenta pórovitosti se nám zároveň zhoršily mechanické vlastnosti, které se bohužel neprojevily při měření tvrdosti mikrotvrdoměrem podle Vickerse ani Brinella. Obě tyto metody totiž zasáhnou velmi malou plochu zkoušeného vzorku a nedošlo tak k propadnutí do žádné pórovité oblasti.

Z výše uvedených výsledků měření vyplývá, že je nutné přijmout opatření jako je kontrola pohyblivosti squeezeových razníků a jejich mazání.

### 3. Závěr

Cílem této studie bylo porovnání struktury a kvality hliníkového odlitku v různých místech. Měření bylo prováděno na 24 vzorcích, které byly odebrány z různých míst odlitku bloku motoru 1.2 HTP. 12 vzorků odebraných z horní části (A) bloku, tzv. místo pod hlavou a zbylých 12 odebráno ze spodní části (B) odlitku v místech, kde je podepřen klikový hřídel na ložiscích, která tuhla pod tlakem (Squeeze-Casting). Po změření tvrdosti, vzorky z místa A vykazovaly stejnou a v několika případech i vyšší tvrdost než vzorky z místa B. Výsledek byl potvrzen oběma metodami měření tvrdosti. Příčina byla zjištěna až na simulaci tuhnutí odlitku, která ukázala, že v horní části bloku dochází k vysoké intenzitě ochlazení.

Při vyhodnocování snímků mikrostruktury bylo určeno procentuální zastoupení pórů v přesně dané ploše. Zde se ukázalo, že vzorky odebrané z místa A mají podobnou pórovitost jako 9 vzorků ze 12 odebraných z místa B. Zbylé tři vzorky ze stejného místa odběru na jednotlivých blocích vykazovaly několikanásobně vyšší pórovitost, která byla způsobena nefunkčností jednoho z razníků squeeze. V důsledku vysokého procenta pórovitosti se nám zároveň zhoršily mechanické vlastnosti, které se bohužel neprojevily při měření tvrdosti mikrotvrdoměrem podle Vickerse ani Brinella. Obě tyto metody totiž zasáhnou velmi malou plochu zkoušeného vzorku a nedošlo tak k propadnutí do žádné pórovité oblasti. Z výsledků měření vyplývá, že je nutné provádět opatření jako je kontrola pohyblivosti squeezeových razníků a jejich mazání. Z uvedených výsledků je zřejmé, že technologie Squeeze-Casting má své opodstatnění. Krystalizací pod tlakem dosahujeme zlepšení mechanických a strukturních vlastností materiálu. Minimalizujeme výskyt vnitřních vad, dosahujeme vysoké kvality a zvyšujeme užité vlastnosti odlitku. Nevýhodou této technologie je vyšší technická a finanční náročnost na zhotovení formy a vlastní výrobu odlitku

#### **4. Použitá literatura**

Bolibruchová Dana a Tillová Eva: Zlievarenské zliatiny Al – Si. Edis Žilina 2005.

Černoch Svatopluk: Strojní technická příručka. SNTL Praha, 1968.

Michna Štefan a kol. : Encyklopedie hliníku. CD-ROM. Adin, s. r. o. Prešov, 2005.

Ragan Emil a kol: Liatie kovov pod tlakom. Fakulta výrobních technologií Prešov, 2007.

Roučka, J. a kolektiv - Metalurgie neželezných kovů, VUT Brno, 1998.

Valecký Jindřich a kol: Lití kovů pod tlakem. SNTL Praha 1963.

Veles Pavol: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. SNTL Praha, 1989.

[www.Wikipedia.cz](http://www.Wikipedia.cz) ze dne 4.6. 2009

## **5. Seznam příloh**

Příloha 1 - Tabulky naměřených hodnot tvrdosti podle Vickerse.

Příloha 2 - Norma EN ISO 18265

Příloha 3 - Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru  
Zkušební blok číslo jedna odlit 8.4.2009 v 9:18: 06

Příloha 4 - Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru  
Zkušební blok číslo dvě odlit 8.4.2009 v 9:20:22

Příloha 5 - Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru  
Zkušební blok číslo tři odlit 8.4.2009 v 9:22: 38



## **6. Přílohy**

## Příloha 1.

Tabulky naměřených hodnot z laboratoře Vickersovou metodou.

**Metoda:** Vickers  
**Objektiv:** 40x  
**Zatížení:** HV 0,1  
**Doba zatížení:** 20,000

### Vzorek 1.1. A

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 102,1         | 42,3           | 42,9           | 42,6          |
| 2 | 101,2         | 42,3           | 43,3           | 42,8          |
| 3 | 94,2          | 43,7           | 45,0           | 44,4          |
| 4 | 95,6          | 44,2           | 43,9           | 44,0          |

**Minimum:** 94,2                      **Maximum:** 102,1  
**Průměr:** **98,3**                      **Medián:** 98,4  
**StDev:** 3,951

### Vzorek 1.1. B

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 74,8          | 49,7           | 49,9           | 49,8          |
| 2 | 78,6          | 47,8           | 49,3           | 48,6          |
| 3 | 73,3          | 50,5           | 50,1           | 50,3          |
| 4 | 79,3          | 48,3           | 48,5           | 48,4          |

**Minimum:** 73,3                      **Maximum:** 79,3  
**Průměr:** **76,5**                      **Medián:** 76,7  
**StDev:** 2,928

### Vzorek 1.2. A

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 88,8          | 46,0           | 45,4           | 45,7          |
| 2 | 99,2          | 43,1           | 43,3           | 43,2          |
| 3 | 98,8          | 44,4           | 42,3           | 43,3          |
| 4 | 111,5         | 41,1           | 40,5           | 40,8          |

**Minimum:** 88,8                      **Maximum:** 111,5  
**Průměr:** **99,6**                      **Medián:** 99,0  
**StDev:** 9,281

### Vzorek 1.2 B

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 89,2          | 46,0           | 45,2           | 45,6          |
| 2 | 85,0          | 45,8           | 47,6           | 46,7          |
| 3 | 88,4          | 46,6           | 45,0           | 45,8          |
| 4 | 86,9          | 46,6           | 45,8           | 46,2          |

**Minimum:** 85,0                      **Maximum:** 89,2  
**Průměr:** **87,4**                      **Medián:** 87,7  
**StDev:** 1,878

**Metoda:** Vickers  
**Objektiv:** 40x  
**Zatížení:** HV 0,1  
**Doba zatížení:** 20,000

**Vzorek 1.3. A**

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 102,1         | 42,3           | 42,9           | 42,6          |
| 2 | 91,6          | 45,8           | 44,2           | 45,0          |
| 3 | 85,4          | 47,8           | 45,4           | 46,6          |
| 4 | 96,5          | 43,5           | 44,1           | 43,8          |

**Minimum:** 85,4                      **Maximum:** 102,1  
**Průměr:** **93,9**                      **Medián:** 94,1  
**StDev:** 7,137

**Vzorek 1.3. B**

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 84,6          | 46,8           | 46,8           | 46,8          |
| 2 | 88,8          | 45,8           | 45,6           | 45,7          |
| 3 | 79,3          | 48,5           | 48,3           | 48,4          |
| 4 | 94,2          | 43,5           | 45,2           | 44,4          |

**Minimum:** 79,3                      **Maximum:** 94,2  
**Průměr:** **86,7**                      **Medián:** 86,7  
**StDev:** 6,337

**Vzorek 1.4. A**

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 96.0          | 43.9           | 43.9           | 43.9          |
| 2 | 81.0          | 47.2           | 48.5           | 47.8          |
| 3 | 90.9          | 45.4           | 45.0           | 45.2          |
| 4 | 90.4          | 44.4           | 46.2           | 45.3          |

**Minimum:** 81.0                      **Maximum:** 96.0  
**Průměr:** **89.6**                      **Medián:** 90,7  
**StDev:** 6.257

**Vzorek 1.4. B**

|   | <b>HV 0,1</b> | <b>d1 [μm]</b> | <b>d2 [μm]</b> | <b>d [μm]</b> |
|---|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 97,8          | 43,3           | 43,7           | 43,5          |
| 2 | 106,7         | 42,3           | 41,1           | 41,7          |
| 3 | 90,0          | 46,2           | 44,6           | 45,4          |
| 4 | 96,0          | 44,4           | 43,5           | 43,9          |

**Minimum:** 90,0                      **Maximum:** 106,7  
**Průměr:** **97,7**                      **Medián:** 96,9  
**StDev:** 6,906

Metoda: Vickers  
Objektiv: 40x  
Zatížení: HV 0,1  
Doba zatížení: 20,000

**Vzorek 2.1. A**

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 90,5   | 44,8    | 45,8    | 45,3   |
| 2 | 92,1   | 45,0    | 44,8    | 44,9   |
| 3 | 96,5   | 44,8    | 42,9    | 43,8   |
| 4 | 96,9   | 43,3    | 44,1    | 43,7   |

Minimum: 90,5                      Maximum: 96,9  
Průměr: **94,0**                      Medián: 94,3  
StDev: 3,211

**Vzorek 2.1. B**

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 79,3   | 47,2    | 49,5    | 48,4   |
| 2 | 88,4   | 46,6    | 45,0    | 45,8   |
| 3 | 83,1   | 47,4    | 47,0    | 47,2   |
| 4 | 80,7   | 48,5    | 47,4    | 47,9   |

Minimum: 79,3                      Maximum: 88,4  
Průměr: **82,9**                      Medián: 81,9  
StDev: 4,028

**Vzorek 2.2. A**

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 84,2   | 46,8    | 47,0    | 46,9   |
| 2 | 86,1   | 46,4    | 46,4    | 46,4   |
| 3 | 90,4   | 44,4    | 46,2    | 45,3   |
| 4 | 82,4   | 46,4    | 48,5    | 47,5   |

Minimum: 82,4                      Maximum: 90,4  
Průměr: **85,8**                      Medián: 85,1  
StDev: 3,438

**Vzorek 2.2. B**

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 86,5   | 46,8    | 45,8    | 46,3   |
| 2 | 89,6   | 46,2    | 44,8    | 45,5   |
| 3 | 86,9   | 46,6    | 45,8    | 46,2   |
| 4 | 87,6   | 45,8    | 46,2    | 46,0   |

Minimum: 86,5                      Maximum: 89,6  
Průměr: **87,7**                      Medián: 87,2  
StDev: 1,405

Metoda: Vickers  
Objektiv: 40x  
Zatížení: HV 0,1  
Doba zatížení: 20,000

#### Vzorek 2.3. A

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 96,5   | 43,7    | 43,9    | 43,8   |
| 2 | 104,1  | 42,3    | 42,1    | 42,2   |
| 3 | 100,7  | 42,9    | 42,9    | 42,9   |
| 4 | 102,1  | 42,7    | 42,5    | 42,6   |

Minimum: 96,5      Maximum: 104,1  
Průměr: **100,9**      Medián: 101,4  
StDev: 3,233

#### Vzorek 2.3. B

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 85,7   | 47,2    | 45,8    | 46,5   |
| 2 | 89,2   | 45,4    | 45,8    | 45,6   |
| 3 | 91,7   | 44,8    | 45,2    | 45,0   |
| 4 | 92,1   | 44,4    | 45,4    | 44,9   |

Minimum: 85,7      Maximum: 92,1  
Průměr: **89,7**      Medián: 90,4  
StDev: 2,945

#### Vzorek 2.4. A

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 90,4   | 45,0    | 45,6    | 45,3   |
| 2 | 95,6   | 43,5    | 44,6    | 44,0   |
| 3 | 95,6   | 44,0    | 44,1    | 44,1   |
| 4 | 90,9   | 44,8    | 45,6    | 45,2   |

Minimum: 90,4      Maximum: 95,6  
Průměr: **93,1**      Medián: 93,2  
StDev: 2,839

#### Vzorek 2.4. B

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 90,4   | 45,8    | 44,8    | 45,3   |
| 2 | 91,7   | 45,2    | 44,8    | 45,0   |
| 3 | 101,0  | 43,6    | 42,1    | 42,8   |
| 4 | 84,6   | 46,4    | 47,2    | 46,8   |

Minimum: 84,6      Maximum: 101,0  
Průměr: **91,9**      Medián: 91,1  
StDev: 6,793

**Metoda:** Vickers  
**Objektiv:** 40x  
**Zatížení:** HV 0,1  
**Doba zatížení:** 20,000

### 3.1. A

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 82,8   | 47,0    | 47,6    | 47,3   |
| 2 | 79,3   | 47,6    | 49,1    | 48,4   |
| 3 | 94,3   | 44,8    | 43,9    | 44,4   |
| 4 | 71,2   | 51,1    | 50,9    | 51,0   |
| 5 | 97,8   | 42,7    | 44,4    | 43,5   |

**Minimum:** 71,2                      **Maximum:** 97,8  
**Průměr:** **85,1**                      **Medián:** 82,8  
**StDev:** 10,934

### 3.1. B

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 76,7   | 47,8    | 50,5    | 49,2   |
| 2 | 75,1   | 50,1    | 49,3    | 49,7   |
| 3 | 76,0   | 48,9    | 49,9    | 49,4   |

**Minimum:** 75,1                      **Maximum:** 76,7  
**Průměr:** **75,9**                      **Medián:** 76,0  
**StDev:** 0,789

### Vzorek 3.2. A

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 99,2   | 42,9    | 43,5    | 43,2   |
| 2 | 99,2   | 43,5    | 42,9    | 43,2   |
| 3 | 103,6  | 41,3    | 43,3    | 42,3   |
| 4 | 100,2  | 42,7    | 43,3    | 43,0   |

**Minimum:** 99,2                      **Maximum:** 103,6  
**Průměr:** **100,6**                      **Medián:** 99,7  
**StDev:** 2,077

### Vzorek 3.2. B

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 85,0   | 46,2    | 47,2    | 46,7   |
| 2 | 89,6   | 45,6    | 45,4    | 45,5   |
| 3 | 86,5   | 46,4    | 46,2    | 46,3   |
| 4 | 97,4   | 43,3    | 43,9    | 43,6   |

**Minimum:** 85,0                      **Maximum:** 97,4  
**Průměr:** **89,6**                      **Medián:** 88,0  
**StDev:** 5,525

Metoda: Vickers  
Objektiv: 40x  
Zatížení: HV 0,1  
Doba zatížení: 20,000

#### Vzorek 3.3. A

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 100,2  | 43,7    | 42,3    | 43,0   |
| 2 | 93,0   | 44,4    | 45,0    | 44,7   |
| 3 | 101,1  | 43,1    | 42,5    | 42,8   |
| 4 | 95,1   | 43,7    | 44,6    | 44,2   |

Minimum: 93,0                      Maximum: 101,1  
Průměr: **97,3**                      Medián: 97,6  
StDev: 3,932

#### Vzorek 3.3.B

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 95,6   | 43,3    | 44,8    | 44,0   |
| 2 | 89,2   | 45,0    | 46,2    | 45,6   |
| 3 | 92,1   | 45,0    | 44,8    | 44,9   |
| 4 | 94,6   | 44,0    | 44,6    | 44,3   |

Minimum: 89,2                      Maximum: 95,6  
Průměr: **92,9**                      Medián: 93,4  
StDev: 2,846

#### Vzorek 3.4. A

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 91,3   | 46,0    | 44,2    | 45,1   |
| 2 | 94,7   | 44,2    | 44,4    | 44,3   |
| 3 | 87,6   | 46,0    | 46,0    | 46,0   |
| 4 | 96,5   | 43,7    | 44,0    | 43,8   |

Minimum: 87,6                      Maximum: 96,5  
Průměr: **92,5**                      Medián: 93,0  
StDev: 3,911

#### Vzorek 3.4. B

|   | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
|---|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 89,6   | 45,4    | 45,6    | 45,5   |
| 2 | 91,7   | 45,0    | 45,0    | 45,0   |
| 3 | 90,5   | 44,8    | 45,8    | 45,3   |
| 4 | 92,1   | 43,7    | 46,0    | 44,9   |

Minimum: 89,6                      Maximum: 92,1  
Průměr: **91,0**                      Medián: 91,1  
StDev: 1,138

## Příloha 2.

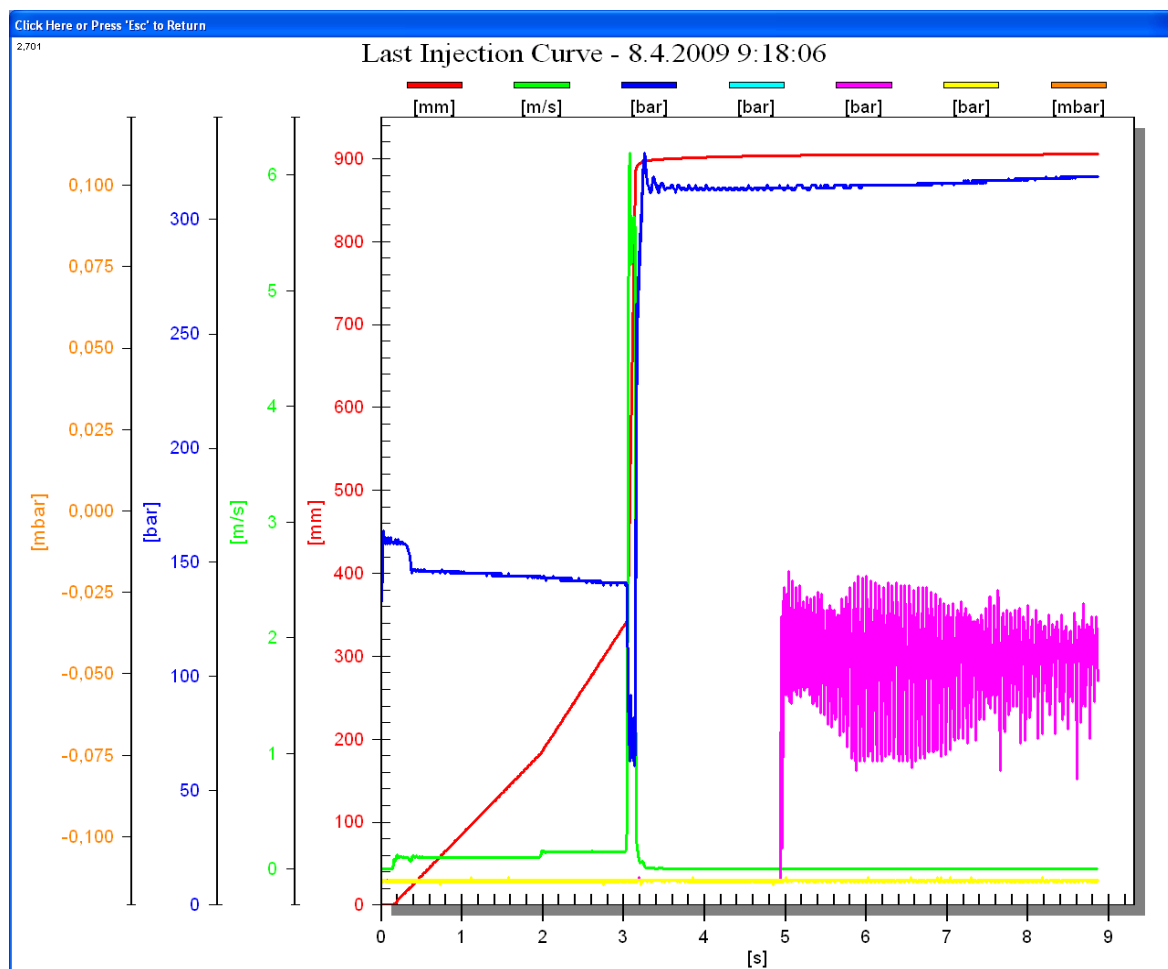
Norma EN ISO 18265

Tabulka 1. Vzájemný převod hodnot tvrdosti.

| Vickers<br>(F>98N)<br>HV | Brinell<br>(0,102 * F/D <sup>2</sup> = 30)<br>HB | Zugfestigkeit<br>Tensile<br>strength<br>Resistance á la<br>tracción<br>N / mm <sup>2</sup> |      |      |      |      |         |         |
|--------------------------|--|--|------|------|------|------|---------|---------|
|                          |  | Rockwell   |      |      |      |      |         |         |
|                          |  |  |      |      |      |      |         |         |
|                          |  |  | HRB  | HRC  | HRA  | HRD  | HR 15 N | HR 30 N |
| 80                       | 76,0   | 255  |      |      |      |      |         |         |
| 85                       | 80,7   | 270  | 41,0 |      |      |      |         |         |
| 90                       | 85,5   | 285  | 48,0 |      |      |      |         |         |
| 95                       | 90,2   | 305  | 52,0 |      |      |      |         |         |
| 100                      | 95,0   | 320  | 56,2 |      |      |      |         |         |
| 105                      | 99,8   | 335  |      |      |      |      |         |         |
| 110                      | 105  | 350  | 62,3 |      |      |      |         |         |
| 115                      | 109  | 370  |      |      |      |      |         |         |
| 120                      | 114  | 385  | 66,7 |      |      |      |         |         |
| 125                      | 119  | 400  |      |      |      |      |         |         |
| 130                      | 124  | 415  | 71,2 |      |      |      |         |         |
| 135                      | 128  | 430  |      |      |      |      |         |         |
| 140                      | 133  | 450  | 75,0 |      |      |      |         |         |
| 145                      | 138  | 465  |      |      |      |      |         |         |
| 150                      | 143  | 480  | 78,8 |      |      |      |         |         |
| 155                      | 147  | 495  |      |      |      |      |         |         |
| 160                      | 152  | 510  | 81,7 |      |      |      |         |         |
| 165                      | 156  | 530  |      |      |      |      |         |         |
| 170                      | 162  | 545  | 85,0 |      |      |      |         |         |
| 175                      | 166  | 560  |      |      |      |      |         |         |
| 180                      | 171  | 575  | 87,1 |      |      |      |         |         |
| 185                      | 176  | 595  |      |      |      |      |         |         |
| 190                      | 181  | 610  | 89,5 |      |      |      |         |         |
| 195                      | 185  | 625  |      |      |      |      |         |         |
| 200                      | 190  | 640  | 91,5 |      |      |      |         |         |
| 205                      | 195  | 660  | 92,5 |      |      |      |         |         |
| 210                      | 199  | 675  | 93,5 |      |      |      |         |         |
| 215                      | 204  | 690  | 94,0 |      |      |      |         |         |
| 220                      | 209  | 705  | 95,0 |      |      |      |         |         |
| 225                      | 214  | 720  | 96,0 |      |      |      |         |         |
| 230                      | 219  | 740  | 96,7 |      |      |      |         |         |
| 235                      | 223  | 755  |      |      |      |      |         |         |
| 240                      | 228  | 770  | 96,1 | 20,3 | 60,7 | 40,3 | 69,6    | 41,7    |
| 245                      | 233  | 785  | 99,5 | 21,3 | 61,2 | 41,1 | 70,1    | 42,5    |
| 250                      | 238  | 800  |      | 22,2 | 61,6 | 41,7 | 70,6    | 43,4    |
| 255                      | 242  | 820  |      | 23,1 | 62,0 | 42,2 | 71,1    | 44,2    |
| 260                      | 247  | 835  | 101  | 24,0 | 62,4 | 43,1 | 71,6    | 45,0    |
| 265                      | 252  | 850  |      | 24,8 | 62,7 | 43,7 | 72,1    | 45,7    |
| 270                      | 257  | 865  | 102  | 25,6 | 63,1 | 44,3 | 72,6    | 46,4    |
| 275                      | 261  | 880  |      | 26,4 | 63,5 | 44,9 | 73,0    | 47,2    |
| 280                      | 266  | 900  | 104  | 27,1 | 63,8 | 45,3 | 73,4    | 47,8    |

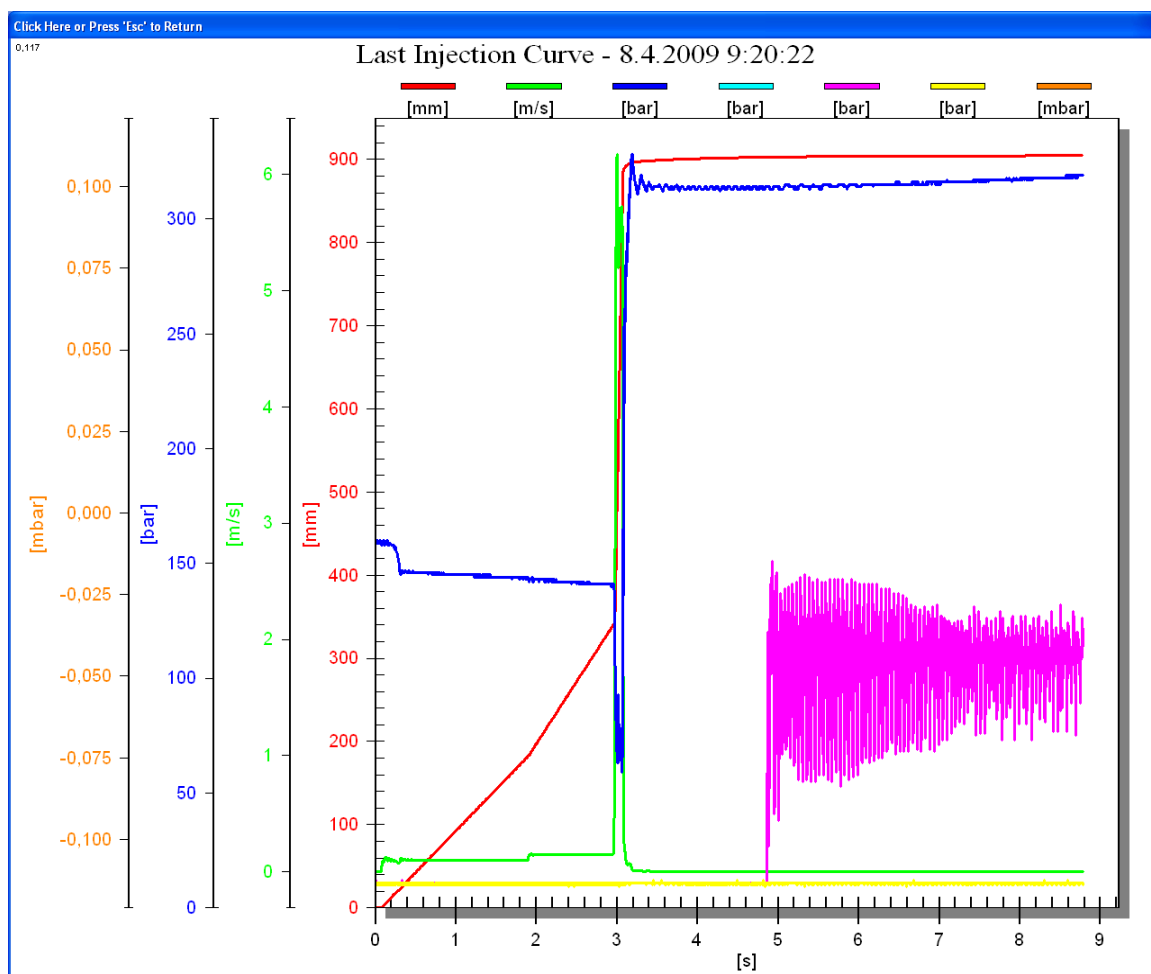


### Příloha 3.



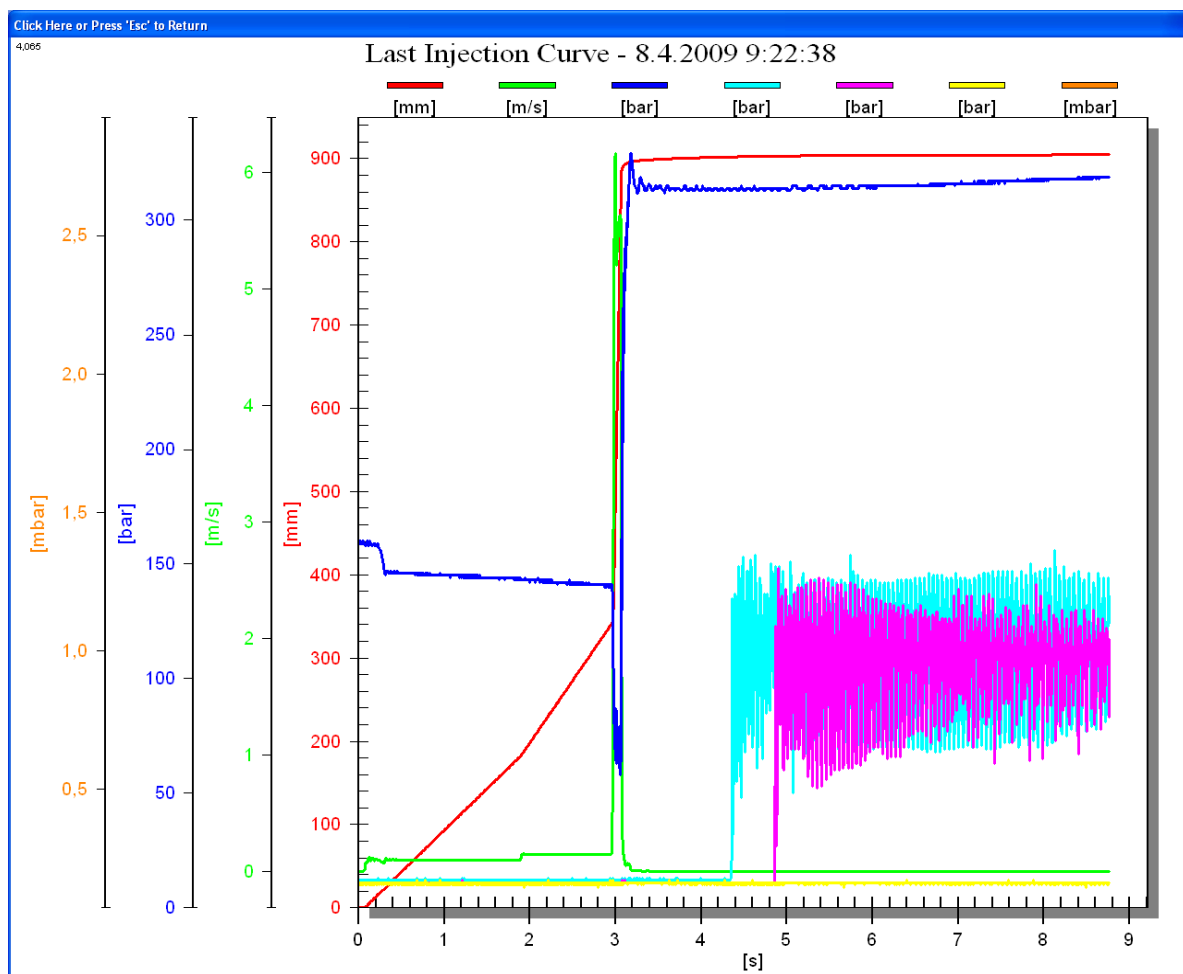
Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru

#### Příloha 4.



Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru

## Příloha 5.



Časový průběh tlaku a rychlosti při odlévání bloku motoru

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita (TUL) v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom, že o této zkušenosti musím informovat TUL; v tomto případě má TUL právo požadovat ode mne úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vpracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci, dne 4.6. 2009

.....

Jozef Čičo